

POSADA EN MARXA I AVALUACIÓ DEL FUNCIONAMENT D'UN FOTOBIORREACTOR PER A LA PRODUCCIÓ DE MICROALGUES



AURA VIDAL CARRASCO

DIRECCIÓ:
TERESA BALANYÀ
ENRICA UGGETTI

GRAU:
ENGINYERIA DE SISTEMES BIOLÒGICS

BARCELONA, JUNY 2018

RESUM

L'ús de l'aigua residual com a recurs és una tecnologia molt prometedora ja que conté components que s'han d'eliminar per poder tornar-la a utilitzar, aquests nutrients poden ser font d'aliment per a algues, que, en augmentar la seva biomassa, es poden utilitzar com a font de bioenergia o per a la generació de bioplàstics.

Aquest Treball Final de Grau forma part de l'inici d'un projecte que consisteix en la posada en marxa d'una planta pilot amb un sistema de fotobiorreactors per al tractament de l'aigua residual i l'avaluació d'aquest sistema per a la producció de cianobacteris per a la posterior producció de biogàs i bioplàstics. Es vol determinar el grau de tractament de l'aigua residual, fer un seguiment sobre el creixement de microalgues i el grau de selecció de cianobacteris.

La planta pilot consta d'un tanc d'entrada que alimenta paral·lelament 3 fotobiorreactors de manera semi contínua, controlat amb el temps de retenció hidràulic. L'efluent dels fotobiorreactors passa a un tanc de recepció i d'aquí a un decantador lamel·lar que separa la biomassa. L'aigua residual a tractar és una mescla d'aigua residual domèstica i aigua residual agrícola. El fotobiorreactor està format per dos tancs de recepció oberts units amb tubs translúcids, es tracta d'un sistema obert-tancat de baix cost.

S'analitzen els paràmetres bàsics per a la caracterització de l'aigua residual; terbolesa, pH, conductivitat elèctrica (CE), sòlids en suspensió totals i volàtils (SST/SSV), amoni, demanda química d'oxigen (DQO), anions i clorofil·la. També es mira la mostra al microscopi per identificar la població de microalgues.

Com a resultats s'observa que no hi ha hagut eliminació de matèria orgànica però l'eliminació de nutrients ha estat satisfactòria. Pel que fa a l'amoni s'han assolit alts nivells d'eliminació, amb valors que van de 88,03 a 93,11%. També s'observa eliminació de nitrats, nitrats i fosfats, encara que és més difícil d'avaluar ja que els continguts inicials són molt baixos.

S'ha aconseguit un augment de la biomassa fotosintètica en els reactors en el transcurs de l'experiència, sobretot en el fotobiorreactor 3. Hi ha hagut problemes tècnics en els fotobiorreactors 1 i 2 que s'han pogut solucionar, i només al fotobiorreactor 3 s'ha aconseguit una població majoritària de cianobacteris els últims dies de funcionament de la planta pilot. Aquesta dominància pot ser deguda als valors alts de pH i a la baixa concentració de fòsfor de l'aigua en els fotobiorreactors.

Així doncs, s'ha aconseguit construir la planta pilot i que funcioni correctament i es conclou que els fotobiorreactors poden assolir els objectius de reducció de nutrients de l'aigua residual i seleccionar cianobacteris, necessaris per a les fases posteriors del projecte.

RESUMEN

El uso de agua residual como recurso es una tecnología muy prometedora ya que contiene componentes que se tienen que eliminar para volver a usar esa agua, esos nutrientes pueden ser una fuente de alimento para las algas, que, al aumentar su biomasa, se pueden utilizar para obtener bioenergía o para generar bioplásticos.

Este Trabajo Final de Grado forma parte del inicio de un proyecto que consiste en la puesta en marcha de una planta piloto de un sistema de fotobiorreactores para el tratamiento del agua residual y evaluación de dicho sistema para la producción de cianobacterias, para la posterior producción de biogás y bioplásticos. Se quiere determinar el grado de tratamiento del agua residual, hacer un seguimiento del crecimiento de las microalgas y el grado de selección de las cianobacterias.

La planta piloto está formada por un tanque de entrada que alimenta paralelamente 3 fotobiorreactores de forma semi continua, controlado por el tiempo de retención hidráulica. El afluente de los fotobiorreactores pasa a un tanque de recepción y de aquí a un decantador lamelar que separa la biomasa. El agua residual a tratar es una mezcla de agua residual doméstica y agua residual agrícola. El fotobiorreactor está formado por dos tanques de recepción unidos con tuberías translúcidas, se trata de un sistema abierto-cerrado de bajo coste.

Se analizan los parámetros básicos para la caracterización del agua residual; turbidez, pH, conductividad eléctrica (CE), aniones y clorofila. También se mira la muestra en el microscopio con el fin de identificar la población de microalgas.

Como resultados, se observa que no ha habido eliminación de materia orgánica pero la eliminación de nutrientes ha estado satisfactoria. El amonio ha conseguido altos niveles de eliminación, con valores que van del 88,03 a 93,11%. También se observa eliminación de nitrito, nitratos y fosforo, aunque es más difícil de evaluar ya que la concentración inicial es muy baja.

Se ha conseguido un aumento de la biomasa fotosintética en los reactores durante la experiencia, sobretodo en el fotobiorreactor 3. Ha habido algunos problemas técnicos en los fotobiorreactores 1 y 2 que se han podido solucionar, solamente en el fotobiorreactor 3 se ha conseguido una población mayoritaria de cianobacterias los últimos días de funcionamiento de la planta piloto. Esta dominancia puede ser debida a los valores altos de pH i a la baja concentración de fosforo en el agua de los fotobiorreactores.

Así, se consigue la construcción de la planta piloto y su correcto funcionamiento y se concluye que los fotobiorreactores pueden alcanzar los objetivos de reducción de nutrientes del agua residual y seleccionar cianobacterias, necesarias para las posteriores fases del proyecto.

ABSTRACT

The use of wastewater as a resource is a promising technology due to the containing of components meant to be eliminated to allow the re-use of that water, moreover these nutrients can be a source of food for the algae. These algae can be used to obtain energy or to generate bioplastic when it increases their biomass.

This Final Degree Project is supposed to be the starting point of a project that consists in the start-up of a pilot plant of a photobioreactor system for the wastewater treatment, as well as the evaluation of this system for the production of cyanobacteria and finally for the subsequent production of biogas and bioplastic. Our main goal is to determine the degree of the residual water treatment and monitor the growth of microalgae as well as the degree of the cyanobacteria selection.

The pilot plant consists of an inlet tank that feeds 3 semi-continuously parallel photobioreactors, controlled by the hydraulic retention time. The photobioreactors effluent goes to a reception tank and from here to a lamellar settler that separates the biomass. The treated-wastewater is a mixture of domestic wastewater and agricultural wastewater. The photobioreactor is composed of two reception tanks joined with translucent pipes. An open/closed low-cost system.

The basic parameters for the characterization of wastewater were analysed; turbidity, pH, electrical conductivity (EC), anions and chlorophyll. The sample was also viewed in microscope in order to identify the population of microalgae.

As a result, it is noted that there has been no elimination of organic matter but the elimination of nutrients has been satisfactory. Ammonium has achieved high levels of elimination, with values ranging from 88,03 to 93,11%. Elimination of nitrite, nitrates and phosphorus was observed as well, although it is more difficult to assess since the initial concentration is very low.

Moreover, an increase in the photosynthetic biomass has been achieved in the reactors during the experiment, especially in the photobioreactor 3. There have been some technical problems in the photobioreactors 1 and 2 that have been solved, only in the photobioreactor 3 has been achieved most of the population of cyanobacteria during the last days of operation of the pilot plant. There may be this dominance due to the high values of pH i at the low concentration of phosphorus in the water of the photobioreactors.

Thus, the construction of the pilot plant and its correct operation was achieved. In conclusion the photobioreactors can achieve the objectives of nutrient reduction of wastewater and select the necessary cyanobacteria for the subsequent phases of the project.



AGRAÏMENTS

Vull agrair la possibilitat de participar en aquest projecte al grup de recerca GEMMA-UPC i obrir-me un món diferent de l'acadèmic, especialment a l'Enrica Uggetti per la paciència i l'ajuda. A la Chus i l'Eduardo per les hores de sol, muntatge de canonades i bombes, al Javi per la paciència al laboratori i a tots els companys i companyes del laboratori. I per ajudar-me a obrir una porta per introduir-me a la cooperació internacional.

A la Teresa Balanyà, per acceptar dur aquest treball; per les reunions, els correus, l'ajuda i les recomanacions.

Per últim, un fort agraïment a la família per l'acompanyament en tot i en tot moment sempre. Als que m'acompanyen en aquest viatge, també.

Moltes gràcies.

ÍNDIX

Índex de figures	6
Índex de taules.....	8
1. PREÀMBUL	9
2. INTRODUCCIÓ.....	10
2.1. CIANOBACTERIS	10
2.2. ÚS DE FOTOBIOREACTORS	12
3. OBJECTIU	15
4. MATERIALS I MÈTODES DE L'ANÀLISIS.....	16
4.1. CARACTERÍSTIQUES DE LA PLANTA PILOT	16
4.1.1. SITUACIÓ I COMPONENTS	16
4.1.2. AIGUA RESIDUAL A TRACTAR I INÒCUL.....	18
4.2. DESCRIPCIÓ DEL FOTOBIOREACTOR UTILITZAT	19
4.3. MOSTREIG.....	22
4.4. MÈTODES D'ANÀLISIS	23
4.4.1. pH	24
4.4.2. CONDUCTIVAT ELÈCTRICA.....	24
4.4.3. DEMANDA QUÍMICA D'OXÍGEN (DQO)	24
4.4.4. ANIONS	25
4.4.5. AMONI (NH ₄ ⁺)	25
4.4.6. TERBOLESA	26
4.4.7. SÒLIDS EN SUSPENSIO (SSV/SST).....	27
4.4.8. CLOROFIL·LA	27
4.4.9. MICROSCÒPIA.....	28
5. RESULTATS I DISCUSSIÓ	29
5.1. Característiques de l'aigua d'entrada.....	29
5.2. pH	30
5.3. Conductivitat Elèctrica (CE)	30
5.4. Demanda química d'oxigen (DQO)	31
5.5. Fòsfor.....	32
5.6. Nitrogen.....	33
5.7. Terbolesa	35
5.8. Sòlids en suspensió (SST/SSV).....	36
5.9. Producció de biomassa	39
5.10. Clorofil·la a	40
5.11. Taula resum de resultats	41
5.12. Evolució del cultiu de microalgues, Microscòpia.....	44
6. CONCLUSIONS.....	50
REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES.....	51
ANNEXOS	53

Índex de figures

Figura 2.1.1. Imatge real d'una cianobacteri, <i>Chroococcus turgidus</i>	11
Figura 2.2.1. Fotobiorreactor obert, sistema raceway per la producció d'algues (National geographic, green sahara photobioreactor ponds)	12
Figura 2.2.2. Fotobiorreactor tancat (EOS, Biological Hydrogen Production)	13
Figura 4.1.1.1. Fotobiorreactor 1, primer pla tanc d'entrada (Foto Aura Vidal, 25/04/2017)	16
Figura 4.1.1.2. Agròpolis, tancs de recepció de la sortida de cadascun dels fotobiorreactors. Construcció de la planta pilot on encara falta tot el sistema dels fotobiorreactors (Foto Aura Vidal, 22/02/2017)	17
Figura 4.1.1.3. Decantador lamel·lar i dipòsit pel polímer natural que permetrà la coagulació. En la foto es pot observar que ja hi ha els col·lectors del fotobiorreactor, però no els tubs de PVC (Foto Aura Vidal, 09/03/2017)	17
Figura 4.1.1.4. Planta pilot acabada (Foto Aura Vidal, 06/06/2017)	17
Figura 4.1.1.5. Planta pilot. (1) Entrada d'aigua del canal, (2) Aigua residual domèstica, (3) Tanc d'homogeneïtzació de l'aigua del canal i de l'aigua residual, (4) Fotobiorreactor 1, (5) Fotobiorreactor 2, (6) Fotobiorreactor 3, (7) Tanc de recepció del fotobiorreactor 1, (8) Tanc de recepció del fotobiorreactor 2, (9) Tanc de recepció del fotobiorreactor 3, (10) Tanc que conté el coagulant (polímer natural), (11) Decantador lamel·lar. (Font pròpia)	18
Figura 4.1.2.1. Introducció de l'inòcul als fotobiorreactors (02/05/2017, Foto Aura Vidal)	19
Figura 4.2.1. Els tres tancs de sortida de cadascun dels fotobiorreactor, el primer pla el 3 i a continuació el 2 i l'1 (Foto Aura Vidal, 23/05/2017)	20
Figura 4.2.2. Secció horitzontal del fotobiorreactor (Mena Mas, 2010)	20
Figura 4.2.3. Sistema del fotobiorreactor amb el tanc d'entrada i sortida (Mena Mas, 2010) ...	21
Figura 4.2.4. Disseny del sistema tubular que connecta els dos tancs del sistema de fotobiorreactors amb les fletxes que indiquen la circulació de fluid (Mena Mas, 2010)	21
Figura 4.3.1. Tanc de d'entrada del fotobiorreactor 3 (Foto Aura Vidal, 23/05/2017)	22
Figura 4.3.2. Per ordre: Primer tanc d'aigua domèstica, segon tanc de mescla d'aigua domèstica i aigua residual agrícola; Fotobiorreactor 1 a l'entrada; Fotobiorreactor 2 a l'entrada; Fotobiorreactor 3 a l'entrada (Foto Aura Vidal 23/05/2017)	23
Figura 4.4.3.1. Tubs de la DQO refredant-se per poder mesurar de manera indirecta la quantitat d'oxigen en l'espectrofotòmetre (Foto Aura Vidal, 18/07/2017)	25
Figura 4.4.5.1. Escala de colors d'amoni del valor mínim al màxim d'absorbància en l'espectrofotòmetre (Foto Aura Vidal, 30/03/2017)	26
Figura 4.4.5.2. Matràs amb les mostres: Blanc, Entrada (diluïda 20:50), FBR1, FBR2, FBR 3, Entrada (diluïda 5:50); observem que els dos matrassos últims estan fora del rang de color, per tant, s'haurà d'augmentar la dilució (Foto Aura Vidal 20/06/2017)	26
Figura 4.4.5.3. Espectrofotòmetre utilitzat per a la quantificació de l'amoni i de la clorofil·la (Foto Aura Vidal 09/04/2018)	26
Figura 4.4.7.1. Per ordre; Filtes abans de l'estufa de l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3 (03/05/2017); Filtes després de l'estufa de l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3 (28/06/2017); Filtes després de la mufla de l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3 (05/07/2017) (Fotos Aura Vidal)	27
Figura 5.2.1. pH a l'entrada, FBR1, FBR2 i FB3	30

Figura 5.3.1. CE a l'entrada, FBR1, FBR2 i FB3	31
Figura 5.4.1. Demanda Química d'Oxigen a l'Entrada, FBR1, FBR2 i FBR3'	31
Figura 5.5.1. Ortofosfats a l'Entrada, FBR1, FBR2 i FBR3	32
Figura 5.6.1. Nitrogen en forma de nitrats a l'Entrada, FBR1, FBR2 i FBR3	33
Figura 5.6.2. Nitrogen en forma de nitrats a l'Entrada, FBR1, FBR2 i FBR3	33
Figura 5.6.3. Amoni (TAN, Total Ammonia Nitrogen) a l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3.	34
Figura 5.6.4. Amoni (TAN, Total Ammonia Nitrogen) al FBR1, FBR2 i FBR3	34
Figura 5.6.5. Nitrogen total a l'Entrada i a cadascun dels fotobiorreactors	35
Figura 5.7.1. Terbolesa a l'entrada, FBR1, FBR2 i FB3.....	35
Figura 5.8.1. Sòlids en suspensió totals a l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3.....	36
Figura 5.8.2. Sòlids en suspensió volàtils a l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3.....	36
Figura 5.8.3. SST i SSV a l'Entrada, Figura 5.8.4. SST i SSV al FBR 1	37
Figura 5.8.5. SST i SSV al FBR 2, Figura 5.8.6. SST i SSV al FBR 3	37
Figura 5.8.7. Terbolesa-SST a l'Entrada, Figura 5.8.8. Terbolesa-SST al FBR 1.....	38
Figura 5.8.9. Terbolesa-SST al FBR 2, Figura 5.8.10. Terbolesa-SST al FBR 3	38
Figura 5.9.1. Producció de biomassa en cadascun dels fotobiorreactors	39
Figura 5.10.1. Clorofil·la al fotobiorreactor 1, 2 i 3.....	40
Figura 5.10.2. Comparació clorofil·la a i producció de biomassa en els fotobiorreactors.....	41
Figura 5.12.1. Mostra del FBR1, microscopi òptic (24/05/2017, Aura Vidal)	44
Figura 5.12.2. Mostra de l'inòcul, microscopi òptic (27/04/2017, Aura Vidal)	44
Figura 5.12.3. Mostra del FBR2, microscopi òptic (27/04/2017, Aura Vidal)	45
Figura 5.12.4. Mostra de l'entrada, microscopi òptic (10/05/2017, Aura Vidal).....	45
Figura 5.12.5. Mostra del FBR3, microscopi òptic (07/06/2017, Aura Vidal)	45
Figura 5.12.6. Mostra FBR3, microscopi òptic (24/05/2017, Aura Vidal)	46
Figura 5.12.7. FBR1, M.O., 17/05/2017, Figura 5.12.8. FBR1, M.O., 24/05/2017.....	46
Figura 5.12.9. FBR1, M.O., 31/05/2017, Figura 5.12.10. FBR1, M.O., 07/06/2017.....	46
Figura 5.12.11. FBR1, M.O., 14/06/2017, Figura 5.12.12. FBR1, M.O., 28/06/2017.....	47
Figura 5.12.13. FBR2, M.O., 24/05/2017, Figura 5.12.14. FBR2, M.O., 31/05/2017.....	47
Figura 5.12.15. FBR2, M.O., 07/06/2017, Figura 5.12.16. FBR2, M.O., 14/06/2017.....	47
Figura 5.12.17. FBR2, M.O., 28/06/2017	47
Figura 5.12.18. FBR3, M.O., 27/04/2017, Figura 5.12.19. FBR3, M.O., 17/05/2017.....	48
Figura 5.12.20. FBR3, M.O., 24/05/2017, Figura 5.12.21. FBR3, M.O., 31/05/2017.....	48
Figura 5.12.22. FBR3, M.O., 07/06/2017, Figura 5.12.23. FBR3, M.O., 14/06/2017.....	48
Figura 5.12.24. Mostra FBR1 microscopi fluorescència (05/07/2017, Aura Vidal).....	49
Figura 5.12.25. Mostra FBR2, microscopi fluorescència (05/07/2017, Aura Vidal).....	49
Figura 5.12.26. Mostra FBR3 microscopi fluorescència (05/07/2017, Aura Vidal).....	49

Índex de taules

Taula 2.2.1. Taula diferències fotobiorreactor obert-tancat (Font pròpia)	13
Taula 4.3.1. Dies d'anàlisi dels paràmetres per a la caracterització de l'entrada, fotobiorreactor 1, fotobiorreactor 2 i fotobiorreactor 3	22
Taula 4.4.1. Filtratge o no filtratge de les mostres de l'entrada i dels fotobiorreactors	24
Taula 5.5.1. Mitjana dels paràmetres per a la caracterització de l'aigua residual de l'Entrada durant tot l'assaig	29
Taula 5.11.1. Mitjana (desviació estàndard) dels paràmetres principals de la mescla d'entrada als fotobiorreactors durant dos períodes de l'experiment	41
Taula 5.11.2. Mitjana (desviació estàndard) dels paràmetres principals del fotobiorreactor durant el primer període de l'experiment	42
Taula 5.11.3. Mitjana (desviació estàndard) dels paràmetres principals del fotobiorreactor durant el primer període de l'experiment	42
Taula I. Valors de Terbolesa, pH, CE i Temperatura de la Mostra 1, 2, 3 i 4	53
Taula II. Valors Sòlids en Suspensió Totals i Volàtils de la Mostra 1	54
Taula III. Valors Sòlids en Suspensió Totals i Volàtils de la Mostra 2	55
Taula IV. Valors Sòlids en Suspensió Totals i Volàtils de la Mostra 3	56
Taula V. Valors Sòlids en Suspensió Totals i Volàtils de la Mostra 4	57
Taula VI. Valors de la Demanda Química d'Oxigen (DQO) de la Mostra 1, 2, 3 i 4	58
Taula VII. Valors de l'Amoni (NH_4^+) de la Mostra 1, 2, 3 i 4	60
Taula VIII. Valors dels Anions (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) de la Mostra 1 i 2	61
Taula IX. Valors dels Anions (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) de la Mostra 3 i 4	62
Taula X. Valors la clorofil·la a de la Mostra 2	63
Taula XI. Valors la clorofil·la a de la Mostra 3	63
Taula XII. Valors la clorofil·la a de la Mostra 4	64
Taula XIII. Valors de la Producció de Biomassa de la Mostra 1, 2 i 3	65

1. PREÀMBUL

La realització d'aquest projecte s'ha dut a terme gràcies a un conveni de col·laboració educativa amb el grup d'investigació en Enginyeria i Microbiologia del Medi Ambient (GEMMA) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

El conjunt d'experiments i assajos que formen part del present Treball Final de Grau, s'han desenvolupat a la finca experimental d'Agròpolis de Viladecans, en la qual s'ha construït una planta pilot, i també en les instal·lacions del laboratori del grup GEMMA, situat al Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental (DECA) a la UPC del Campus Nord de Barcelona, concretament a l'edifici D1.

El grup GEMMA es dedica bàsicament a la innovació, a la transferència de coneixement i a l'educació en enginyeria ambiental. Particularment, en els àmbits de biotecnologia ambiental, de subministrament d'aigua, de tractament d'aigües residuals i residus sòlids i de generació de bioenergia. El projecte en el qual he participat s'anomena INCOVER, "Innovative Eco-Technologies for Resource Recovery from Wastewater". Aquest projecte neix de la necessitat d'un canvi radical al sector de l'aigua que ha impulsat l'interès de la Unió Europea cap a idees innovadores en el sector. Pretén oferir una resposta a la necessitat de solucions tècniques pel tractament d'aigües residuals que siguin, alhora, capaces de promoure la reutilització i de generar nous recursos.

Aquest projecte té una durada de 3 anys i aquest treball se centra en la posada en marxa de la planta pilot i en l'estudi del seu funcionament.

2. INTRODUCCIÓ

Vivim en una societat cada vegada més conscient dels problemes ambientals. Especialment sensibilitzada amb l'aigua, la depuració de l'aigua residual ha esdevingut no només una tendència ambientalista, sinó una necessitat per tal d'optimitzar-la com a recurs. La demanda d'aigua potable augmenta i, paral·lelament, cada vegada n'hi ha menys a l'abast de bona qualitat.

L'aigua residual conté un nombre considerable de compostos orgànics i inorgànics que s'han d'eliminar per tal de poder tornar a utilitzar aquesta aigua. O dit altrament: l'aigua residual és una font de nutrients pel creixement d'algues. Aquestes algues, juntament amb els bacteris, fan la feina de depuració de l'aigua, augmenten la seva biomassa i, amb ella, en podem obtenir nombroses utilitats. De fet, l'ús d'aigua residual és considerada una tecnologia molt prometedora i sostenible per tal de reduir costos de producció (nutrient i aigua).

Actualment hi ha molts estudis relacionats amb el cultiu de microalgues i els seus metabòlits. Trobem de gran interès el cultiu de microalgues per a la producció de bioenergia, biocombustibles o la generació de bioplàstics. Amb l'ús d'aigües residuals estem utilitzant un residu com a substrat.

En aquest Treball Final de Grau es mostra un estudi del tractament de l'aigua residual mitjançant fotobiorreactors. Allò que es busca és un cultiu de cianobacteris majoritari per poder seguir amb les següents fases de l'estudi que s'explicaran a continuació.

2.1. CIANOBACTERIS

Els cianobacteris, o també anomenades algues blaves, són un tipus de microalgues procariotes, aeròbiques i fotosintètiques. Aquests microorganismes tenen una gran història d'adaptació i evolució que els ha permès la capacitat de sintetitzar una gran varietat de compostos bioactius i altres subproductes de gran valor (Mimouni et al., 2012). Durant les últimes dècades, ha sorgit un gran interès en la indústria per produir cianobacteris, ja que són un dels grups de microorganismes més prometedors per a l'aïllament de productes bioquímicament actius molt innovadors com alguns antibiòtics, antifúngics o antivirals (Abed et al., 2009; Shalaby, 2011). Els cianobacteris es diferencien d'altres algues eucariotes, ja que tenen el potencial d'assimilar i d'emmagatzemar, entre altres compostos, el glucogen i els polifosfats, a més de trobar-se en gran concentració en aigua contaminada.

La producció de microalgues i cianobacteris requereix elevades concentracions de nutrients essencials (C, N, P, S, K, Fe, etc.) (Markou et al., 2014).

Els tres nutrients més significatius són el carboni, el nitrogen i el fòsfor i normalment s'assimilen de manera inorgànica, tot i que algunes formes orgàniques també són assimilables. Les principals formes en què es troba el nitrogen en l'aigua residual sense tractar és N orgànic i

NH_4^+ (amoni). En l'aigua tractada també es pot trobar NO_2^- (nitrit) i NO_3^- (nitrat). Pel que fa al fòsfor, la forma majoritària és el PO_4^{3-} (ortofosfat o fosfat). A la *Figura 2.1.1.* podem observar una imatge real d'un cianobacteri.



Figura 2.1.1. Imatge real d'un cianobacteri, *Chroococcus turgidus*

Hi ha molts estudis relacionats amb el cultiu de cianobacteris i els seus metabòlits, tanmateix, el cultiu de cianobacteris no és gens fàcil, encara que els medis es presentin estrictament controlats amb total esterilitat de medi i substrat. En la majoria de casos observem que els cultius es contaminen amb altres tipus d'algues, principalment algues verdes (*Chlorophyta*). A més, s'ha observat que aconseguir cultius purs estrictament controlats no és viable en l'àmbit industrial, ja que tenen uns costos de producció massa elevats i, com a conseqüència, és un producte car i incompatible amb el mercat.

No obstant, en el cas d'aplicacions no alimentàries ni sanitàries, com és el cas de la producció de bioenergia, dels biocombustibles o de la generació de bioplàstics, no es requereix un control sanitari tant elevat. Un enfocament alternatiu per a la producció de cianobacteris pot ser l'ús d'aigües residuals, utilitzant un residu com a substrat. De fet, l'ús de l'aigua residual és considerada una tecnologia molt prometedora i sostenible per tal de reduir costos de producció (de nutrients i aigua). Però, com ja hem mencionat, són cultius molt fàcils de contaminar, per tant, obtenir una població dominant de cianobacteris en sistemes de tractaments d'aigües residuals és difícil. Un dels problemes més importants és la competició amb algues verdes i els factors que controlen aquesta competició no són del tot coneguts.

La majoria d'informació referent als diferents factors de control del creixement i predomini de cianobacteris es troba en literatura d'aigua dolça, com llacs i estanys tot i que també poden viure en aigua salada. En aquests medis, el seu desenvolupament depèn dels diferents factors químics i físics —com ara la intensitat de la llum, la temperatura, la turbulència, el pH i altres factors biòtics. Molts estudis coincideixen en el fet que els nivells de concentració de nitrogen i fòsfor i la relació entre ells (N:P) són les dues claus que determinen la competència entre algues verdes i cianobacteris.

2.2. ÚS DE FOTOBIORREACTORS

Per tal de poder desenvolupar un cultiu de cianobacteris experimentalment s'utilitzen fotobiorreactors. Un fotobiorreactor és un biorreactor que incorpora algun tipus de font de llum per tal que els microorganismes puguin fer la fotosíntesi.

Actualment hi ha dos tipus de fotobiorreactor destinats al creixement de les microalgues:

- **Raceways o fotobiorreactors oberts.** Aquest sistema és molt simple tal i com podem veure a la *Figura 2.2.1*. Està compost d'un circuit circular amb canals oberts a l'atmosfera, en què la solució aquosa circula mentre captura la llum solar. L'avantatge d'aquest sistema és que aquests fotobiorreactors són molt econòmics. D'altra banda, els desavantatges són que aquest sistema no permet tenir un bon control de les condicions òptimes pel cultiu de microalgues i que el cultiu es pot contaminar fàcilment amb diferents contaminants (algues i microorganismes no desitjats).



Figura 2.2.1. Fotobiorreactor obert, sistema *raceway* per la producció d'algues (National geographic, green sahara photobioreactor ponds)

- **Fotobiorreactors tancats.** S'han desenvolupat molts sistemes diferents per evitar els desavantatges que suposen els fotobiorreactors oberts. Bàsicament són sistemes hidràulics tancats, majoritàriament tubulars com el de la *Figura 2.2.2.*, per on circulen els cultius d'algues. Aquest sistema permet creixements més intensius d'algues, requereix menys superfície i no hi ha risc de contaminació. D'altra banda, amb aquesta tecnologia l'oxigen produït durant la fotosíntesi pot assolir elevades concentracions i arribar a ser tòxic per a les algues i els bacteris. Aquest pot ser un problema difícil i car de solucionar. A més, el cost de la instal·lació pot ser fins a 10 vegades més car que el dels *raceway* (Mata *et al.*, 2010), per tant, no són econòmicament viables. En aquest tipus de fotobiorreactors s'ha observat la creació de *biofouling*, és a dir, el creixement d'algues a la paret dels tubs, que impedeix que la llum entri dins del tub i, per tant, no permeten fer la fotosíntesi a les microalgues situades al centre, cosa que provoca la seva mort. De fotobiorreactors tancats hi ha diferents sistemes: verticals, horitzontals, helicoïdals i panells de paret (biofaçana).



Figura 2.2.2. Fotobiorreactor tancat (EOS, Biological Hydrogen Production)

Taula 2.2.1. Taula diferències fotobiorreactor obert-tancat (Font pròpia)

FOTOBIORREACTOR OBERT	FOTOBIORREACTOR TANCAT
- No hi ha control de paràmetres de creixement	+ Hi ha control de paràmetres de creixement
- No control de condicions de cultiu	+ Control de condicions de cultiu
- Pèrdua de diòxid de carboni	+ Reducció de pèrdues de diòxid de carboni
- Risc de contaminació molt alt	+ Risc de contaminació baix
- Control de contaminació difícil	+ Control de contaminació fàcil
- Esterilitat impossible	+ Esterilitat possible
- Control d'espècies molt difícil	+ Control d'espècies possible i fàcil
- Composició cel·lular constant difícil	+ Composició cel·lular constant fàcil
- Poca densitat cel·lular	+ Molta densitat cel·lular
- Àrea/volum baix	+ Àrea/volum alt, més producció
- Productivitat baixa	+ Productivitat alta
+ Econòmic	- Molt car
+ Intercanvi de gasos amb l'atmosfera	- No hi ha intercanvi de gas amb l'atmosfera
+ Intercanvi de d'oxigen amb l'atmosfera	- Necessitat d'eliminació d'oxigen
+ Difusió natural de diòxid de carboni	- Adició de diòxid de carboni
+ El <i>biofouling</i> no afecta la superfície	- Hi ha <i>biofouling</i>
+ Distància entre parets no té importància	- Distància entre tubs té importància
- Circulació i turbulència depèn de motor	- Circulació i turbulència depèn de motor
- Mort cel·lular per fricció	- Mort cel·lular per fricció
- Dany del material per exposició a la llum	- Dany del material per exposició a la llum
- A l'estiu, s'ha de refredar el sistema	- A l'estiu, s'ha de refredar el sistema

Com ja s'ha comentat i com es pot veure a la taula, els fotobiorreactors oberts tenen limitacions sobretot pel que fa al risc de contaminació d'altres espècies de microalgues i, per tant,



és difícil obtenir una població majoritària de cianobacteris, ja que altres microalgues els fan molta competència. Els fotobiorreactors tancats necessiten grans quantitats d'energia per funcionar, per tant, fora d'escala de laboratori molts cops és inviable. Ens trobem en la necessitat de desenvolupar un fotobiorreactor que sigui tècnicament i econòmicament viable per produir microalgues a gran escala.

3. OBJECTIU

L'objectiu d'aquest Treball Final de Grau és la posada en marxa d'una planta pilot amb un sistema de fotobiorreactors per al tractament de l'aigua residual i l'avaluació d'aquest sistema per a la producció de cianobacteris i per a la posterior producció de biogàs i bioplàstics.

Els objectius específics del Treball Final de Grau són els següents:

- Determinar el grau de tractament de l'aigua residual aconseguit per la planta pilot, tant pel que fa a la matèria orgànica com pel que fa als nutrients (N i P).
- Fer un seguiment sobre el creixement de microalgues i sobre el grau de selecció de cianobacteris a l'aigua residual. El terme selecció es refereix al fet d'obtenir un cultiu dominant —majoritàriament format per cianobacteris, no un cultiu pur.

L'estudi experimental d'aquest Treball Final de Grau s'ha realitzat a Agròpolis i al Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental de la UPC.

4. MATERIALS I MÈTODES DE L'ANÀLISIS

En aquest apartat s'explicarà la planta pilot experimental d'Agròpolis, el fotobiorreactor utilitzat per al cultiu de microalgues i del qual es fa el mostreig per poder realitzar totes les anàlisis al laboratori. Per últim, es detallaran els paràmetres que s'han analitzat, els diferents assajos i la metodologia utilitzada per obtenir els valors corresponents.

4.1. CARACTERÍSTIQUES DE LA PLANTA PILOT

4.1.1. SITUACIÓ I COMPONENTS

La planta pilot es troba situada a la finca experimental d'Agròpolis de la UPC situada en el Parc Agrari del Baix Llobregat (Viladecans, Espanya).

Primerament, les aigües residuals a tractar es mesclen en un tanc d'homogeneïtzació. Paral·lelament, s'alimenten els tres fotobiorreactors i de manera semi contínua (l'aigua d'entrada entra al matí), tal com podem observar a la *Figura 4.1.1.1*. El procés es controla amb el temps de retenció hidràulic (TRH).

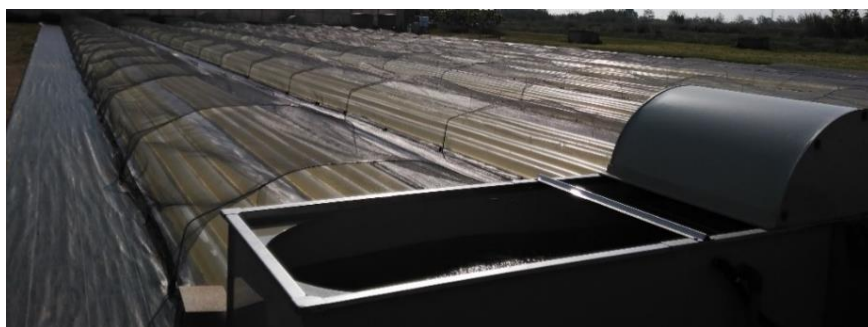


Figura 4.1.1.1. Fotobiorreactor 1, en primer pla el tanc d'entrada (Foto Aura Vidal, 25/04/2017)

Posteriorment, la mescla d'aigua de cadascun dels fotobiorreactors passa als tancs de recepció per separat, un per a cada fotobiorreactor, tal com es pot veure a la *Figura 4.1.1.2*. Finalment, l'efluent dels biorreactors passa a un decantador lamel·lar (*Figura 4.1.1.3*), on, gràcies a l'ajuda d'un polímer natural, es duu a terme un procés de coagulació-floculació i sedimentació de la biomassa. Aquesta tècnica permet augmentar la mida del flòcul generat i la velocitat de sedimentació, realitzant una separació sòlid-líquid molt eficaç i, així, una separació de la biomassa que conté el líquid de mescla dels fotobiorreactors. La tecnologia lamel·lar, a més, permet incrementar la superfície útil de decantació i reduir la superfície ocupada.



Figura 4.1.1.2. Agròpolis, tancs de recepció de la sortida de cadascun dels fotobiorreactors. Construcció de la planta pilot on encara falta tot el sistema dels fotobiorreactors (Foto Aura Vidal, 22/02/2017)



Figura 4.1.1.3. Decantador lamel·lar i dipòsit pel polímer natural que permetrà la coagulació. En la foto es pot observar que ja hi ha els col·lectors del fotobiorreactor, però no els tubs de PVC (Foto Aura Vidal, 09/03/2017).

L'efluent del decantador, en una fase posterior, se sotmetrà a ultrafiltració i desinfecció amb radiació ultraviolada en un sistema alimentat exclusivament amb energia solar abans de ser reutilitzada com a aigua de regadiu en els cultius presents en el camp d'Agròpolis. D'altra banda, la biomassa separada serà aprofitada en part per produir bioplàstics i en part per a la generació de biogàs mitjançant un digestor anaeròbic.

A la *Figura 4.1.1.4*. Observem la planta pilot un cop finalitzada.



Figura 4.1.1.4. Planta pilot acabada (Foto Aura Vidal, 06/06/2017)

La imatge de la *Figura 4.1.1.5.* que hi ha a continuació és un esquema de la planta pilot.

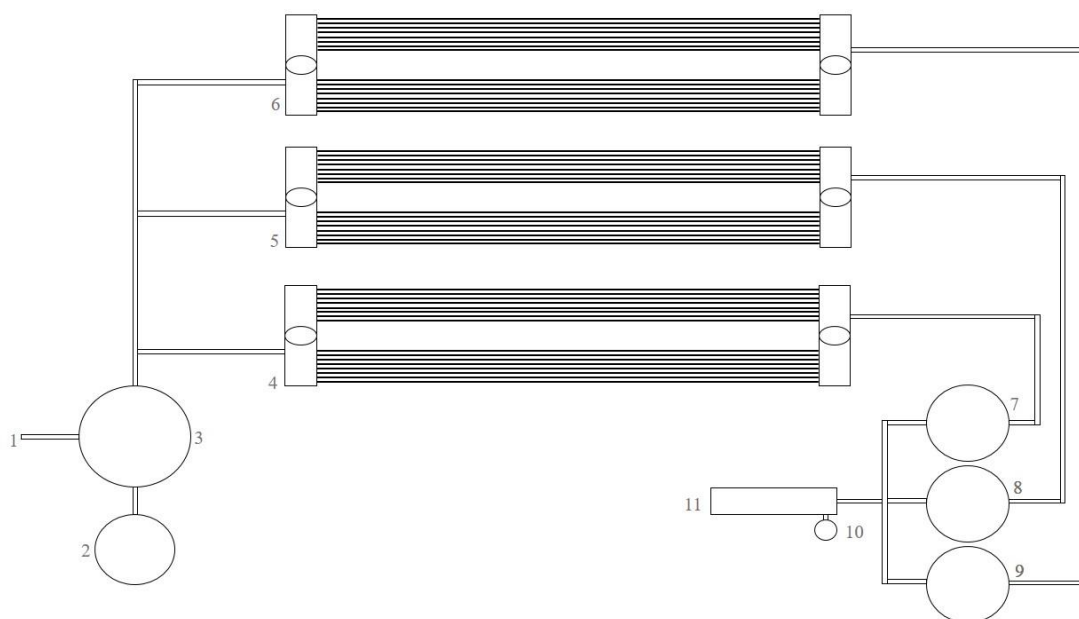


Figura 4.1.1.5. Planta pilot. (1) Entrada d'aigua del canal, (2) Aigua residual domèstica, (3) Tanc d'homogeneïtzació de l'aigua del canal i de l'aigua residual, (4) Fotobiorreactor 1, (5) Fotobiorreactor 2, (6) Fotobiorreactor 3, (7) Tanc de recepció del fotobiorreactor 1, (8) Tanc de recepció del fotobiorreactor 2, (9) Tanc de recepció del fotobiorreactor 3, (10) Tanc que conté el coagulant (polímer natural), (11) Decantador lamel·lar. (Font pròpia)

Vaig participar en la construcció de la planta pilot fins a l'inici del seu funcionament, amb les connexions de tubs, disposició dels dipòsits i muntatge de les bombes.

4.1.2. AIGUA RESIDUAL A TRACTAR I INÒCUL

L'aigua tractada és una mescla d'aigua residual domèstica (de les pròpies instal·lacions d'Agròpolis) i agrícola (procedent dels canals que subministren aigua al parc agrari del Baix Llobregat).

Un cop iniciat el funcionament i l'aigua circulava per tot el circuit, vam introduir 10 L d'inòcul a cadascun dels fotobiorreactors (*Figura 4.1.2.1*). Aquest inòcul es va introduir per tal d'assegurar la presència de microalgues a l'inici del funcionament, contenia majoria d'algues verdes i poques cianobacteris. De totes maneres, aquesta quantitat d'inòcul no és gens significativa pel volum total de cadascun dels fotobiorreactors.



Figura 4.1.2.1. Introducció de l'inòcul als fotobiorreactors (02/05/2017, Foto Aura Vidal)

Els resultats obtinguts en diferents estudis indiquen que es poden seleccionar cianobacteris a partir de consorcis d'algues mixtes cultivades a fotobiorreactors alimentats amb aigües residuals (Arias et al., 2017).

4.2. DESCRIPCIÓ DEL FOTOBIORREACTOR UTILITZAT

El fotobiorreactor utilitzat és un model patentat per J. F. Mena Mas (Mena Mas, 2010).

Aquest fotobiorreactor permet el cultiu de microorganismes fotosintètics i està compost per un circuit hidràulic per on circula la solució aquosa que conté el medi pels microorganismes fotosintètics que queden exposats a la llum. El fotobiorreactor permet incorporar diòxid de carboni i injectar de nutrients al sistema. La injecció de nutrients només es fa en el cas en que els nutrients de l'aigua d'entrada al sistema no siguin suficients per al creixement dels cianobacteris. En el punt on es troba el projecte no s'ha instal·lat el sistema per incorporar el diòxid de carboni (CO₂), però a la *Figura 5.2.2.* de la patent podem observar un requadre on s'indica.

El circuit hidràulic dels fotobiorreactors (que anomenarem simplement fotobiorreactor) està format per dos tanc de recepció oberts, un conjunt de tubs translúcids de PVC que connecten els tancs de recepció un a un i un dispositiu que permet el moviment del fluid del primer tanc al segon a través dels tubs —tal com observem a la *Figura 4.2.1.* i a la *Figura 4.2.2.* Cada tanc receptor té una presa que ajuda a mantenir dos nivells del fluid, que permet que l'aigua es mogui amunt i avall a cada tanc de recepció amb l'ajuda de les aspes (*Figura 4.2.2.*). El conjunt conforma un fotobiorreactor tubular horitzontal.

Els tancs de recepció oberts estan fets d'una mescla de polièster i HDPE (*High Density Polyethylene*).



Figura 4.2.1. Els tres tancs de sortida de cadascun dels fotobiorreactor, el primer pla el 3 i a continuació el 2 i l'1 (Foto Aura Vidal, 23/05/2017)

Els tubs translúcids de PVC tenen unes parets transparents on les algues poden aprofitar la llum i els nutrients presents a l'aigua residual per tal de desenvolupar-se i, mitjançant la fotosíntesi, generar oxigen. Aquest oxigen permet la degradació aeròbica per part dels bacteris dels diferents contaminants orgànics present a l'aigua. Per tant, aquest sistema no té necessitat d'aireació afegida gràcies a l'oxigen procedent de la fotosíntesi. A més, com ja s'ha comentat, hi ha un dispositiu que permet el moviment del fluid i aquest moviment també genera una petita aireació dins dels col·lectors.

Hi ha un total de 3 circuits, és a dir, 3 fotobiorreactors amb un volum de 10 m^3 cadascun on hi entra un cabal de $1 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Cada fotobiorreactor està format per dos col·lectors oberts connectats entre ells amb 16 tubs, 8 d'anada i 8 de tornada, de PCV transparents pels quals circula el líquid de la mescla (aigua residual i agrícola) amb la mescla de microalgues i bacteris. Aquests tubs fan 49 m de llargada i 11 cm de diàmetre.

S'ha desenvolupat un fotobiorreactor obert-tancat, de baix cost i on es minimitzen els efectes esmentats dels fotobiorreactors oberts.

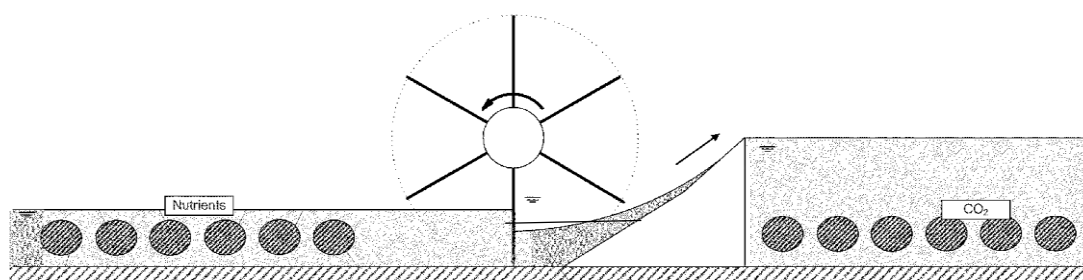


Figura 4.2.2. Secció horitzontal del fotobiorreactor (Mena Mas, 2010)

A la *Figura 4.2.2.*, 4.2.3 i 4.2.4. observem que només hi ha 12 tubs, més endavant es va modificar aquest disseny i trobem 8 tubs a cada costat, agrupats de 4 en 4 (*Figura 4.2.1*).

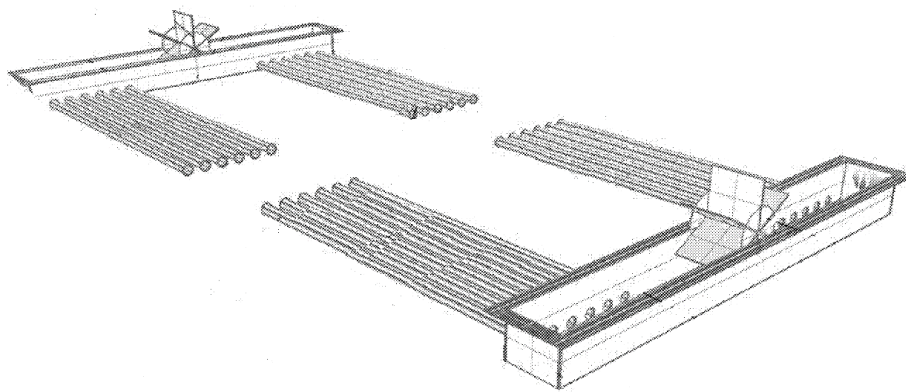


Figura 4.2.3. Disseny del sistema del fotobiorreactor amb el tanc d'entrada i sortida (Mena Mas, 2010)

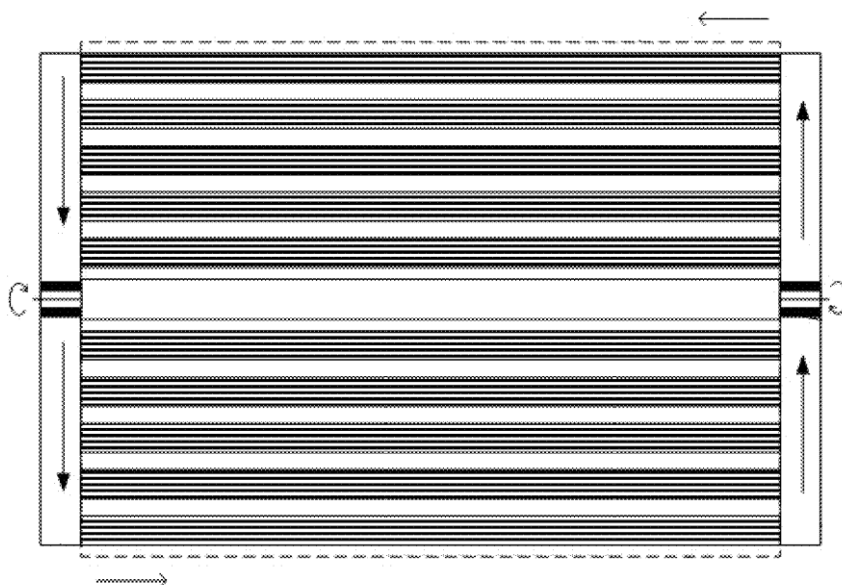


Figura 4.2.4. Disseny del sistema tubular que connecta els dos tancs del sistema de fotobiorreactors amb les fletxes que indiquen la circulació de fluid (Mena Mas, 2010)

Per últim, fa falta mencionar el Temps de Retenció Hidràulica (TRH) escollit per aquest fotobiorreactor. El TRH és el temps que passa des que l'aigua entra al fotobiorreactor fins que en surt com a efluent.

$$TRH = \frac{V_{reactor}}{Q_{entrada}}$$

On $V_{reactor}$ és el volum del fotobiorreactor i $Q_{entrada}$ el cabal d'entrada al fotobiorreactor.

En estudis similars, en què hi ha bàsicament una població d'algues verdes i cianobacteris a l'inici, com a l'inòcul que s'ha introduït al sistema, s'ha escollit un TRH de 10 dies degut al major creixement que presenten els cianobacteris en estudis similars (Arias et al., 2017).

4.3. MOSTREIG

El mostreig s'ha efectuat durant 3 mesos amb una periodicitat setmanal. Cada dia de mostreig es recullen 4 mostres per tal de fer una caracterització de l'aigua a diferents punts del circuit:

- Tanc de mescla que conté l'aigua residual domèstica i l'agrícola.
- Fotobiorreactor 1, Fotobiorreactor 2, Fotobiorreactor 3.

En cadascun dels fotobiorreactors la mostra es recull del tanc de recepció (*Figura 4.3.1.*) més allunyat de la sortida, concretament al punt on l'aspa que permet el moviment retorna l'aigua. Tots els paràmetres es mesuren periòdicament cada setmana al laboratori i el mostreig es realitzarà entre les 11:00 i la 13:00 del migdia.



Figura 4.3.1. Tanc de d'entrada del fotobiorreactor 3 (Foto Aura Vidal, 23/05/2017)

A la *Taula 4.3.1.* es mostren els dies en què es feia el mostreig i cadascuna de les anàlisis dels diferents paràmetres a mesurar per fer la caracterització de l'aigua. Els paràmetres a mesurar per a la caracterització de l'aigua residual són: terbolesa, pH, CE (Conductivitat Elèctrica), SST (Sòlids en Suspensió Totals), SSV (Sòlids en Suspensió Volàtils), amoni, DQO (Demanda Química d'Oxigen), anions, clorofil·la i microscòpia.

Taula 4.3.1. Dies d'anàlisis dels paràmetres per a la caracterització de l'entrada, fotobiorreactor 1, fotobiorreactor 2 i fotobiorreactor 3

	DIMARTS				DIMECRES			
	Entrada	FBR 1	FBR 2	FBR 3	Entrada	FBR 1	FBR 2	FBR 3
MOSTREIG	X	X	X	X				
TERBOLESA	X	X	X	X				
pH	X	X	X	X				
CE	X	X	X	X				
SST/SSV	X	X	X	X	X	X	X	X
AMONI	X	X	X	X				
DQO	X	X	X	X				
ANIONS	X	X	X	X				
CLOROFÍL·LA		X	X	X		X	X	X
MICROSCOPIA					X	X	X	X

Degut al fet que els cultius amb microalgues tenen la particularitat de ser sensibles a una sèrie de paràmetres com la temperatura, l'exposició solar, la composició de l'aigua d'entrada o la possible contaminació d'aquesta, totes les mostres seran recollides en les mateixes condicions. Si no fos així, els resultats experimentals d'aquestes mostres no es podrien comparar els uns amb els altres i, per tant, no se'n podrien treure conclusions.

A la *Figura 4.3.2.* s'observa d'on es prenen cadascuna de les mostres:

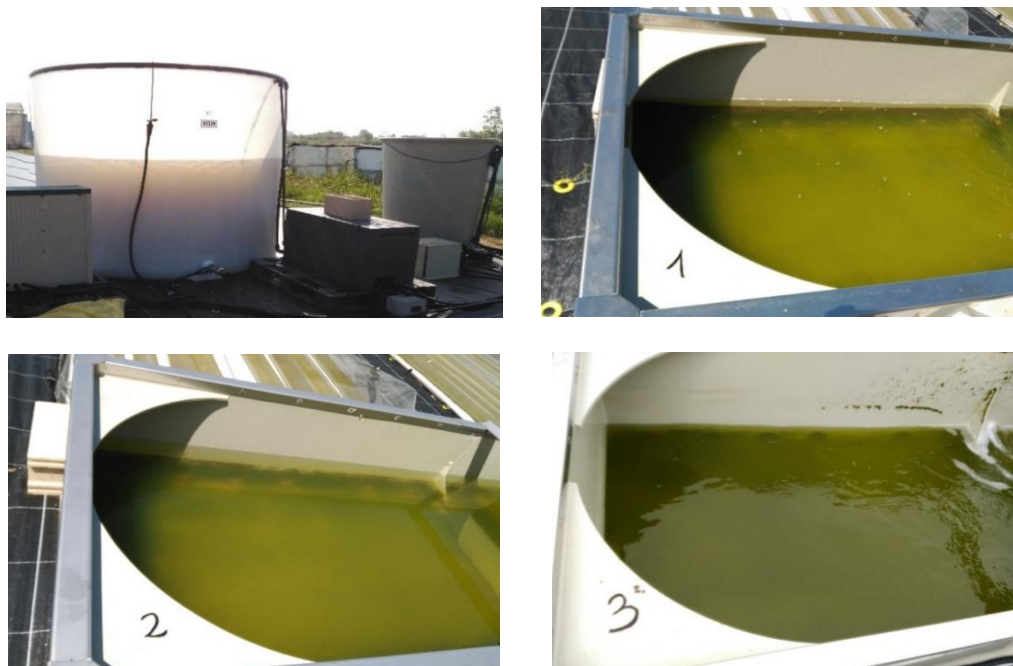


Figura 4.3.2. Per ordre: Primer tanc d'aigua domèstica, segon tanc de mescla d'aigua domèstica i aigua residual agrícola; Fotobiorreactor 1 a l'entrada; Fotobiorreactor 2 a l'entrada; Fotobiorreactor 3 a l'entrada (Foto Aura Vidal 23/05/2017)

4.4. MÈTODES D'ANÀLISIS

Pel que fa a la distribució dels mètodes d'anàlisi per a la caracterització de l'aigua, es troben ordenats en relació als objectius del present treball. Primer trobem els que fan referència al propi tractament de l'aigua residual (pH, N, P i DQO) i a continuació els que fan referència a la quantificació de microalgues presents a l'aigua (terbolesa, sòlids suspesos, clorofil·la a i observació microscòpica).

La *Taula 4.4.1.* indica si pel mètode d'anàlisi corresponent s'havia de filtrar o no la mostra d'aigua. Tant aquesta taula com la *Taula 4.3.2.* estan ordenades per ordre tal com es feien les anàlisis al laboratori.

Taula 4.4.1. Filtratge o no filtratge de les mostres de l'entrada i dels fotobiorreactors

	Entrada	FBR 1	FBR 2	FBR 3
TERBOLESA	No filtrada	No filtrada	No filtrada	No filtrada
pH	No filtrada	No filtrada	No filtrada	No filtrada
CE	No filtrada	No filtrada	No filtrada	No filtrada
SST/SSV	No filtrada	No filtrada	No filtrada	No filtrada
AMONI	Filtrada	Filtrada	Filtrada	Filtrada
DQO	No filtrada	Filtrada	Filtrada	Filtrada
ANIONS	Filtrada	Filtrada	Filtrada	Filtrada
CLOROFÍL·LA	-	No filtrada	No filtrada	No filtrada
MICROSCOPIA	No filtrada	No filtrada	No filtrada	No filtrada

4.4.1. pH

El pH és la unitat de mesura per quantificar l'acidesa o basicitat d'una dissolució, que es determina per concentració de H_3O^+ en dissolució. Es defineix com a menys el logaritme decimal d'aquesta catió hidroni. En dissolucions aquoses té una escala que va de 0 a 14, en la qual el nombre 7 determina el pH neutre. Els valors inferiors a 7 indiquen acidesa, i superiors a 7 basicitat. El seu valor ens indica de manera indirecta l'activitat de les microalgues de les mostres.

Metodologia: es mesura mitjançant un mètode potenciomètric i l'instrument utilitzat és un pH-metre.

4.4.2. CONDUCTIVAT ELÈCTRICA

És la mesura de la capacitat d'un material o substància per deixar passar el corrent elèctric, en aquest cas és l'aptitud d'una aigua per transmetre el corrent elèctric. És una mesura indirecta de la presència de sals solubles. Com més conductivitat elèctrica, més concentració en sals a l'aigua.

Metodologia: es mesura mitjançant un conductímetre i les unitats són $\mu S/cm$ a $25^\circ C$

4.4.3. DEMANDA QUÍMICA D'OXÍGEN (DQO)

Aquest paràmetre determina l'oxidabilitat de la matèria orgànica present a una mostra d'aigua mitjançant un oxidant químic potent. El resultat s'expressa com l'oxigen equivalent al dicromat potàssic consumit a l'oxidar en medi àcid i en calent una mostra d'aigua residual durant 2 hores. És una mesura indirecta de la quantitat de matèria orgànica i un dels paràmetres a caracteritzar per assegurar una correcta depuració de les aigües residuals.

Metodologia: S'ha seguit el mètode 5220D de l'*Standard Methods* (APHA/WWA-WPCF, 2001). Per a la mostra del tanc de mescla, mesurem la DQO total, i per a les tres mostres de cadascun dels fotobiorreactors mesurem la DQO soluble, en què la mostra d'aigua s'ha de filtrar prèviament. La determinació es realitza per triplicat tal, podem observar 12 tubs a la *Figura 4.4.3.1*.



Figura 4.4.3.1. Tubs de la DQO refredant-se per poder mesurar de manera indirecta la quantitat d'oxigen en l'espectrofotòmetre (Foto Aura Vidal, 18/07/2017)

4.4.4. ANIONS

Amb aquest anàlisi es volen quantificar els nutrients que hi ha en el medi de cultiu (mitjançant aquestes dades podem obtenir molta informació). Per exemple, si no hi ha nutrients els microorganismes no creixeran o moriran. Els nutrients que s'analitzen són nitrats (NO_3^-), nitrats (NO_3^-), ortofosfats (PO_4^{3-}) i sulfats (SO_4^{2-}).

Metodologia: a partir de la mostra filtrada i per cromatografia iònica.

4.4.5. AMONI (NH_4^+)

L'amoni present en les aigües acostuma a venir de processos metabòlics, agropecuaris o industrials. En el cas que es vulgui que creixin microalgues, la presència d'amoni indica la presència de nitrogen disponible perquè les algues puguin sintetitzar proteïnes.

Aquest assaig s'ha realitzat una vegada a la setmana tant de l'entrada com de cadascun dels fotobiorreactors seguint el mètode Solorzano (Solorzano, 1969).

Metodologia: S'ha seguit el mètode Solorzano, que consisteix en la formació d'un compost acolorit amb la concentració d'amoni corresponent, la qual es determina per espectrofotometria (*Figura 4.4.5.3.*) amb una llum de longitud d'ona de 604 nm.

A la *Figura 4.4.5.1.* i *Figura 4.4.5.2.* podem observar fotos de l'assaig realitzat amb la metodologia esmentada.



Figura 4.4.5.1. Escala de colors d'amoni del valor mínim al màxim d'absorbància en l'espectrofotòmetre (Foto Aura Vidal, 30/03/2017)



Figura 4.4.5.2. Matrassos amb les mostres: Blanc, Entrada (diluïda 20:50), FBR1, FBR2, FBR 3, Entrada (diluïda 5:50); observem que els dos matrassos últims estan fora del rang de color, per tant, s'haurà d'augmentar la dilució (Foto Aura Vidal 20/06/2017)



Figura 4.4.5.3. Espectrofotòmetre utilitzat per a la quantificació de l'amoni i de la clorofil·la (Foto Aura Vidal 09/04/2018)

4.4.6. TERBOLESA

Un fluid tèrbol és un fluid que conté partícules en suspensió, tant orgàniques com inorgàniques, i que li treuen la transparència. Aquesta terbolesa és deguda a la dispersió de la llum causada per la presència de sòlids suspesos i col·loïdals en un fluid. Per tant, podem dir que és una propietat òptica de l'aigua i una mesura indirecta de la concentració de matèria en suspensió de la mostra analitzada.

Metodologia: pel mètode Nefelomètric, que consisteix en fer passar un raig de llum a través de la mostra i que mitjançant un detector fotoelèctric, ens determina la intensitat de llum dispersada 90 graus per la mostra en unes condicions definides i en front a un patró.

L'instrument utilitzat és un nefelòmetre o turbidímetre i les unitats de mesura són les Unitats Nefelomètriques de Terbolesa (UNT). Per fer el calibratge s'utilitzen patrons de formazina.

4.4.7. SÒLIDS EN SUSPENSIO (SSV/SST)

Aquest assaig pretén quantificar els sòlids d'una mostra d'aigua que poden ser retenguts per un filtre. Aquests sòlids poden tenir una procedència mineral o orgànica. Es diferencien els sòlids en suspensió total (SST) i els sòlids en suspensió volàtils (SSV). Els primers són tots els sòlids, suspesos i retenguts en un filtre després de la filtració d'un volum concret de mostra. En canvi, els sòlids en suspensió volàtils són la part orgànica que s'obté després de sotmetre el filtre a la mufla a 550°C, es volatilitzen i, per tant, es perden.

La determinació de SSV és una mesura indirecta per calcular la fracció de matèria orgànica suspesa de la mostra. També poden servir per mesurar el creixement de biomassa.

Aquest assaig s'ha realitzat una vegada a la setmana tant de l'entrada com de cadascun dels fotobiorreactors.

Metodologia: s'ha seguit el mètode gravimètric 2540 C i 2540 D de l'*Standard Methods* (APHA-AWWAPCF, 2001). Les determinacions s'han realitzat per triplicat (*Figura 4.4.7.1.*).

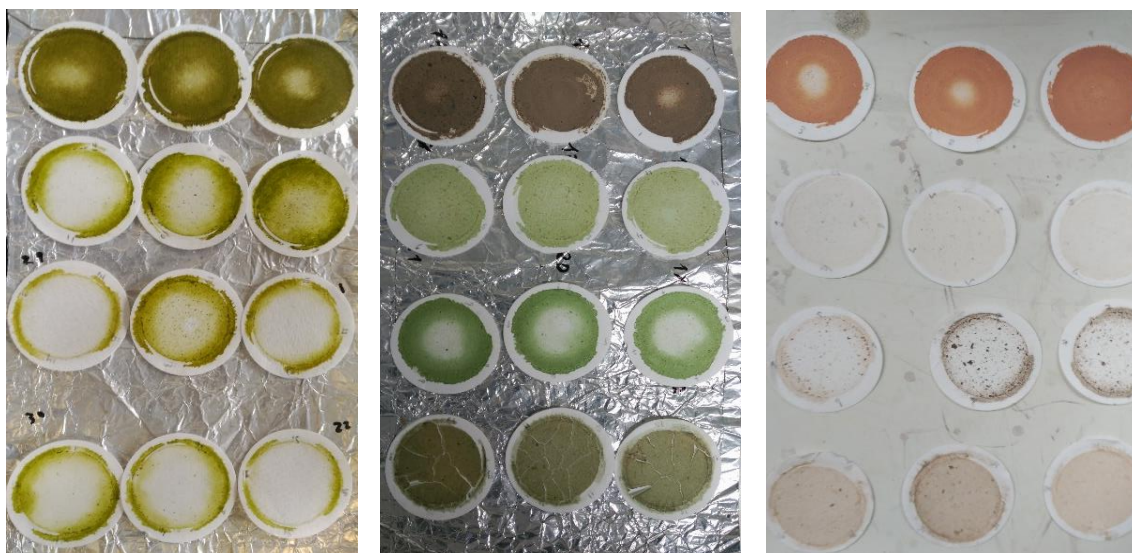


Figura 4.4.7.1. Per ordre; Filtres abans de posar a l'estufa de l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3 (03/05/2017); Filtres després de l'estufa de l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3 (28/06/2017); Filtres després de sortir de la mufla de l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3 (05/07/2017) (Fotos Aura Vidal)

4.4.8. CLOROFIL·LA

Amb aquesta anàlisi el que volem quantificar és la concentració de clorofil·la a present a la mostra. Mesurar la clorofil·la és una manera indirecta de mesurar la biomassa viva. Es quantifica la clorofil·la a, ja que aquesta forma de la clorofil·la es troba en tots els casos, incloent els cianobacteris; en canvi, la clorofil·la b és pròpia dels plasts de les algues verdes (Speer, 1997).

Aquest assaig s'ha realitzat una vegada a la setmana a cadascun dels fotobiorreactors.

Metodologia: el mètode que s'ha seguit per a la quantificació és el 10200H descrit a l'*Standard Methods* (APHA-AWWA-WPCF, 2001). En aquest cas, es fan dues rèpliques, però

només de les mostres de cadascun dels fotobiorreactors, ja que és la biomassa viva la que ens interessa (la que conté la població de cianobacteris). S'ha obtingut un extracte de clorofil·la amb acetona alcalinitzada a partir de diferents centrifugacions. S'ha determinat l'absorbància o densitat òptica (OD) a l'espectrofotòmetre, un cop calibrat a 750 nm a 630, 647, 664 i 750 nm de longitud d'ona.

Amb els resultat obtinguts i mitjançant la següent fórmula, obtenim la concentració de clorofil·la a.

$$Ca = 11,85(OD_{664}) - 1,54(OD_{647}) - 0,08(OD_{639})$$

$$\text{Clorofil·la a} = \frac{Ca * \text{volum extret (L)}}{\text{Volum de la mostra (m3)}}$$

On el volum de la mostra són 5 mL.

4.4.9. MICROSCÒPIA

Mitjançant la microscòpia s'ha pogut dur a terme la identificació de les espècies presents en les mostres d'aigua dels fotobiorreactors amb l'ajuda del llibre "*Atlas de los Microorganismos de Agua Dulce, La vida en una gota de agua*" (Heinz, 1987). S'ha realitzat amb el microscopi òptic Nikon Optiphot i un microscopi de fluorescència.

Aquest assaig s'ha realitzat una vegada a la setmana a cadascun dels fotobiorreactors.

Amb el microscopi de fluorescència s'observen exactament les cèl·lules dels cianobacteris, ja que aquestes desprenen una mica de llum a una longitud d'ona determinada. Això és degut al fet que a aquesta determinada llum d'ona s'excita un polímer determinat que tenen els cianobacteris. D'aquesta manera, s'obté un resultat quantitativament molt més fiable amb el microscopi de fluorescència que amb l'òptic, ja que amb l'òptic és molt més difícil i confús de determinar els cianobacteris.

Per tant, tant amb l'observació amb un microscopi com amb un altre, s'ha pogut determinar de forma qualitativa quina ha sigut l'evolució de les microalgues presents als fotobiorreactors.

5. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Tots els valors numèrics dels resultats obtinguts al llarg del mostreig estan recollits en un Excel i se n'han creat les corresponents gràfiques per tal de poder-los analitzar i comparar amb més facilitat. Als annexos s'inclouen les taules de totes les dades recollides.

5.1. Característiques de l'aigua d'entrada

Es farà una caracterització general de l'aigua residual d'entrada a la planta pilot per saber el seu grau de contaminació. Els resultats mostrats són una mitjana de tots els dies de funcionament de la taula pilot i es comparen amb els valors establerts per Metcalf i Eddy (2003).

La mitjana del pH durant tot el mostreig és de 8,3 i la CE de 2,5 mS/cm a 25°C. La *Taula 5.5.1.* conté els valors dels altres paràmetres i la concentració que dicta el grau de contaminació (Metcalf i Eddy, 2003).

Taula 5.5.1. Mitjana dels paràmetres per a la caracterització de l'aigua residual de l'Entrada durant tot l'assaig

Contaminants	Entrada	Concentració		
		Dèbil	Mitjana	Forta
SST (mg/L)	78,6	120	720	1230
SSV (mg/L)	27,3	95	160	315
DQO (mg/L)	120,4	250	430	800
Amoni (mg/L)	12,3	12	25	45
Nitrits (mg/L)	1,0	0	0	0
Nitrats (mg/L)	8,4	0	0	0
Fòsfor inorgànic (mg/L)	0,8	3	5	8

El pH d'aquesta aigua és una mica alt ja que en aigües naturals es troba entre 6 i 8 (Lapeña i Rigola, 1989).

El valor tant baix de la DQO ens indica que hi ha un grau de contaminació per matèria orgànica molt dèbil. També són molt baixos els nivells de fòsfor inorgànic i sòlids en suspensió. Pel que fa al nitrogen en forma d'amoni la contaminació és de nivell baixa a diferència dels nitrits i els nitrats els quals la concentració hauria de ser 0. Aquestes últimes formes de nitrogen poden provenir de l'origen agrícola de l'aigua residual, per pèrdues d'adobatge, no obstant, son valors baixos.

En els següents apartats s'explicaran aquests paràmetres més detalladament pel que fa a cadascuna de les mostres dels fotobiorreactors i a la *Taula 5.11.1* es mostraran tots els paràmetres de l'entrada analitzats més detalladament, tenint en compte el rang i la desviació.

5.2. pH

Els cianobacteris poden viure a un rang de pH molt ampli (6-11) i en alguns estudis s'observa un millor creixement a un pH proper a 9 (Fuenmayor et al., 2009). A més, diferents experiments demostren que, quan el pH és superior a 10, les algues verdes deixen de competir amb els cianobacteris (Arias et al., 2017). Com observem a la *Figura 5.2.1*, el pH de l'entrada es troba una mica per sota d'aquest valor, però en els fotobiorreactors, on han de créixer els cianobacteris, aquest valor és superior a 10.

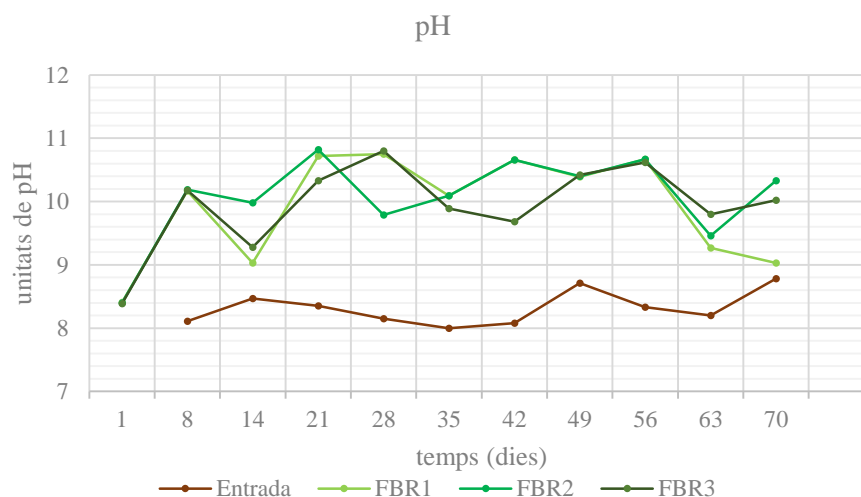


Figura 5.2.1. pH a l'entrada, FBR1, FBR2 i FB3

Aquests valors de pH tan alts són deguts a la captació de CO₂ per part de la pròpia fotosíntesi, però són valors normals que indiquen que hi ha una activitat de les microalgues. Bàsicament tenen aquest valors alts perquè el mostreig es feia al matí i l'anàlisi al migdia.

Així, a causa a l'alt pH que s'assoleix, és esperable una baixa competència de les algues verdes amb els cianobacteris, tal com ens interessa.

5.3. Conductivitat Elèctrica (CE)

A la *Figura 5.3.1*, observem que la conductivitat elèctrica dels fotobiorreactors és una mica més baixa al fotobiorreactors que a l'entrada i que en aquests, tendeix a incrementar.

Aquest resultat no és gaire significatiu.

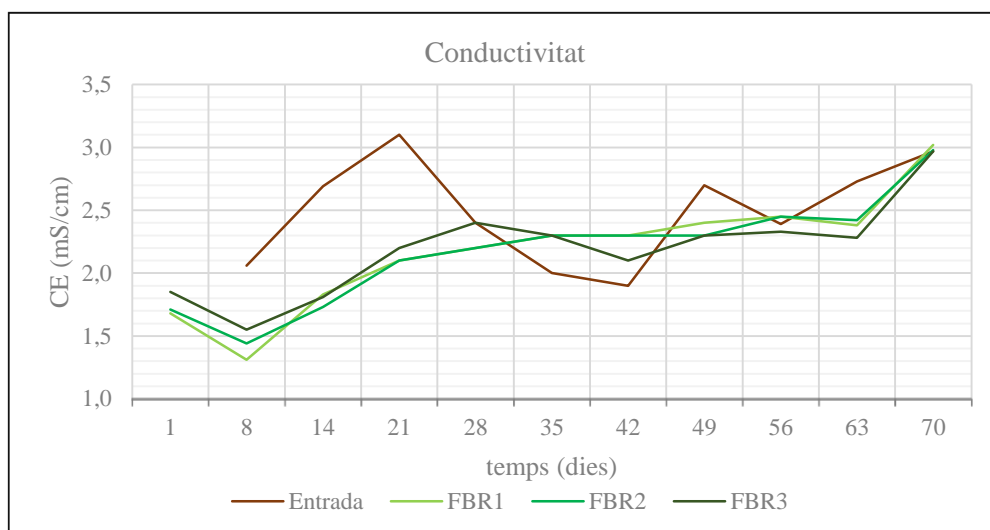


Figura 5.3.1. CE a l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3

5.4. Demanda química d'oxigen (DQO)

S'ha realitzat la quantificació de DQO en mg L^{-1} tant a la mostra d'entrada com a cadascun dels fotobiorreactors per determinar la quantitat de matèria orgànica a l'aigua. És un valor molt important per a la determinació de la qualitat de l'aigua.

Com es mostrava en la *Taula 4.4.1*, la mostra de l'entrada no estava filtrada; en canvi, la dels fotobiorreactors, sí. Per tant, en els fotobiorreactors només es quantificarà la matèria orgànica soluble. Aquesta decisió s'ha pres perquè, com s'ha vist en l'explicació de la planta pilot, l'aigua dels fotobiorreactors, després de passar pels tancs de recepció, se'n va a un decantador, on, amb l'ajuda d'un coagulador, hi ha una etapa de separació sòlid-líquid en què s'obté aigua clarificada i biomassa (matèria orgànica no soluble). El que ens mostren les anàlisis dels fotobiorreactors de la *Figura 5.4.1* és aquesta aigua clarificada amb la matèria orgànica soluble.

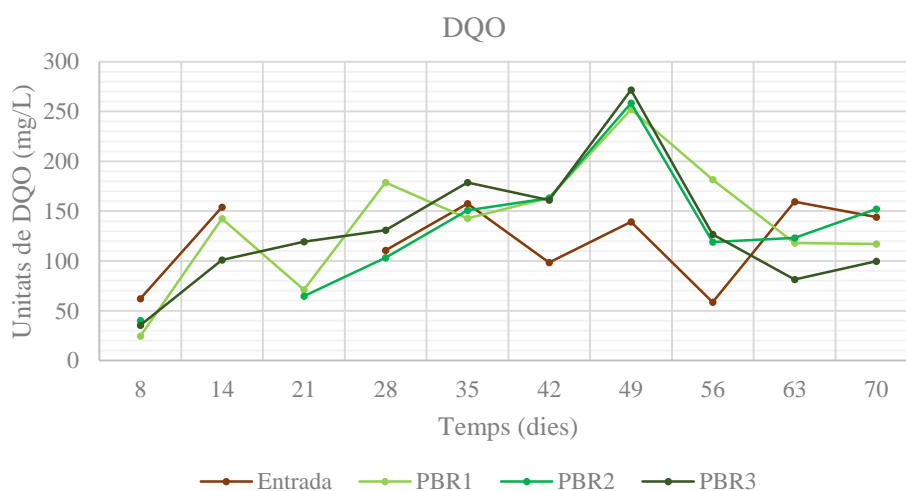


Figura 5.4.1. Demanda Química d'Oxigen a l'Entrada, FBR1, FBR2 i FBR3

Tal com ens mostra la *Figura 5.4.1.*, la DQO inicial és molt baixa per tractar-se d'una aigua residual, fins i tot presenta continguts inferiors als que correspondrien a una aigua residual domèstica de contaminació baixa, xifrada en 250 mg L^{-1} (Metcalf i Eddy, 2003).

Podem observar un període a l'inici en què la DQO de l'entrada i la DQO de sortida són similars. Al dia 42, això canvia i la DQO de la sortida és superior a la DQO d'entrada. Durant un període de 3 setmanes, finalment, en els últims dos mostreigs tornem a la situació inicial. El dia 49 hi ha registre d'una fallada elèctrica durant el cap de setmana a la planta pilot, impedit així el moviment dels fluids del circuit i augmentant la biomassa i la DQO.

Aquests resultats mostren que no hi ha un procés d'eliminació de matèria orgànica, segurament perquè no hi ha hagut prou temps perquè es desenvolupin els bacteris heteròtrofs i/o el medi no és l'adequat (pH molt elevat).

Segons la Directiva sobre el tractament d'aigües residuals 271/91/CEE, el límit de concentració per al seu abocament és de 125 mg L^{-1} , valor que els últims dies de mostreig s'hi aproxima molt.

5.5. Fòsfor

El fòsfor es troba en forma d'ortofosfats (PO_4^{3-}), que són els que proporcionen el fòsfor necessari als cianobacteris.

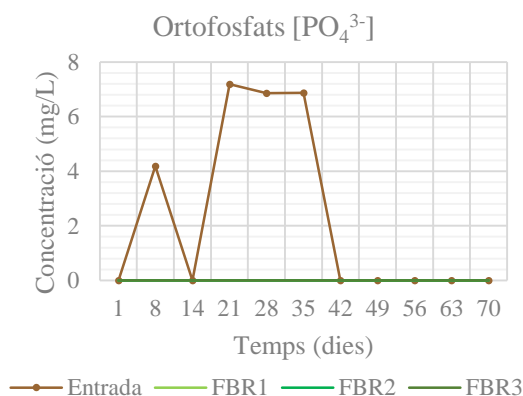


Figura 5.5.1. Ortofosfats a l'Entrada, FBR1, FBR2 i FBR3

Observem que són consumits al 100%. A un estudi (Arias et al., 2017), s'explica que valors baixos de fòsfor promouen una dominància dels cianobacteris sobre les algues verdes. El primer mes i mig de funcionament de la planta pilot observem valors molt superiors, per tant, pel que fa referència a aquesta característica, no hi pot haver dominància de cianobacteris en aquest període pel que fa al fòsfor.

A partir del dia 42, hi havia una concentració tan baixa de fòsfor que la metodologia utilitzada no el detectava (aquest límit estava per sota dels $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ de PO_4^{3-}). És obvi que hi

havia d'haver presència de fòsfor per sota d'aquest límit perquè, si no, no hagués sigut possible el creixement de microalgues.

Un ecosistema d'un llac presenta valors de fòsfor (PO_4^{3-}) de $0,107 \text{ mg L}^{-1}$, mentre que un estanc amb un efluent secundari d'aigua residual industrial té concentracions de $2,37 \text{ mg L}^{-1}$ de fòsfor (PO_4^{3-}) i presentarà una concentració de biomassa molt superior (Beaulieu et al, 2013). Per tant, en comparació a la concentració de l'ecosistema d'un llac, en els fotobiorreactors hi poden créixer microalgues.

5.6. Nitrogen

A continuació, seguint amb l'anàlisi dels anions, es mostraran els resultats de nitrats (NO_3^-) a la *Figura 5.6.1.*, de nitrits (NO_2^-) a la *Figura 5.6.2.*, d'amoni (NH_4^+) a la *Figura 5.6.3.* i de nitrogen total (suma d'amoni, nitrits i nitrats) a la *Figura 5.6.5.*

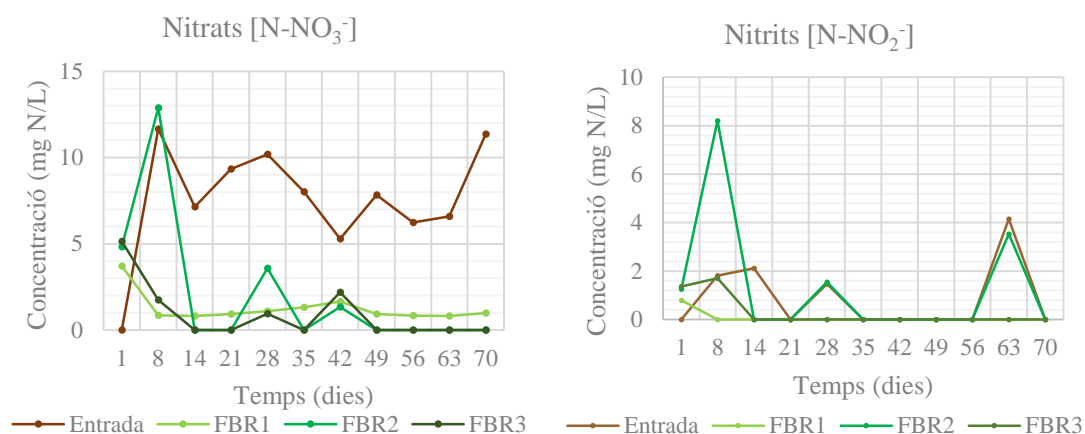


Figura 5.6.1. Nitrogen en forma de nitrats a l'Entrada, FBR1, FBR2 i FBR3

Figura 5.6.2. Nitrogen en forma de nitrits a l'Entrada, FBR1, FBR2 i FBR3

En la *Figura 5.6.1* observem que els nitrats de l'entrada tenen un percentatge d'eliminació força gran; en canvi, pel que fa als nitrits a l'entrada, els resultats ens mostren que són nuls, exceptuant algun moment concret. En aquests pics, en què hi ha presència de nitrits, tampoc hi ha eliminació per part dels fotobiorreactors, ja que el nitrogen és assimilat per les microalgues en forma d'amoni i de nitrats (Alexis i Jose, 2014).

L'amoni (NH_4^+) o TAN (*Total Ammonia Nitrogen*) és una font de nitrogen important per al creixement de les microalgues, ja que els permet sintetitzar les proteïnes. La presència d'amoni a l'entrada indica que hi ha possibilitat que creixin les microalgues i l'incorporin en la seva estructura, ja que és una de les formes en què el nitrogen s'ha de torbar per tal de ser disponible per al cultiu de microalgues.

Aquesta poca constància en els valors de la mostra de l'entrada pot ser deguda al fet que la composició d'aigua domèstica de l'entrada no era constant, per exemple, al cap de setmana.

També trobem tres gràfiques amb l'evolució d'amoni a cadascun dels fotobiorreactors, ja que a la *Figura 5.6.3* no es poden observar les variacions dels fotobiorreactors a causa de la diferència de resultats a l'entrada.

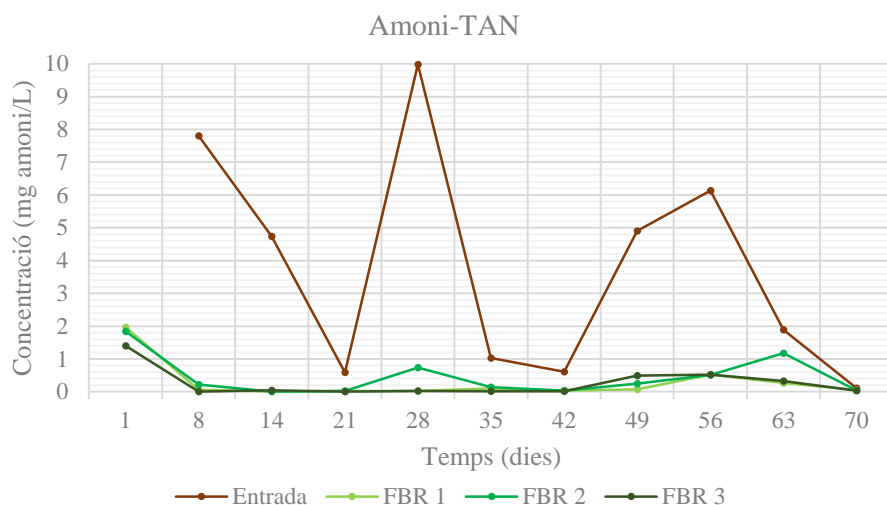


Figura 5.6.3. Amoni (TAN, Total Ammonia Nitrogen) a l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3.

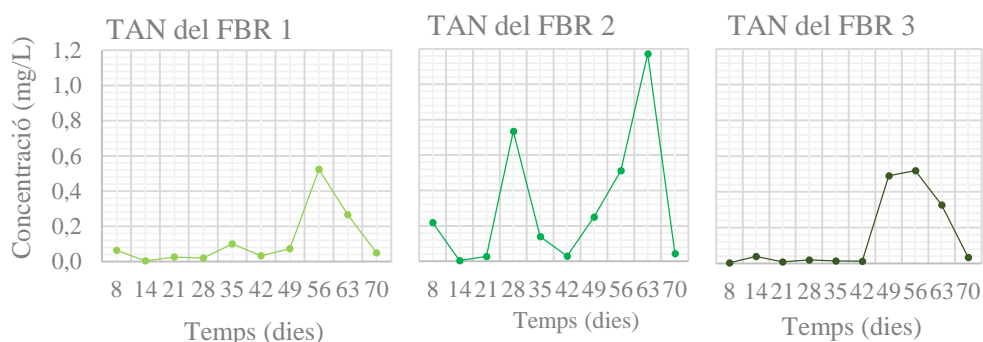


Figura 5.6.4. Amoni (TAN, Total Ammonia Nitrogen) al FBR1, FBR2 i FBR3

Com es pot observar, a la mostra d'entrada hi ha una quantitat d'amoni molt superior que a les mostres dels fotobiorreactors, en què l'amoni té valors propers a zero. Això indica una correcta eliminació, o, millor dit, un consum adequat d'amoni dins dels fotobiorreactors per part dels microorganismes que hi viuen. Pel que fa al comportament a cadascun dels fotobiorreactors, hi ha diferències en l'eliminació d'amoni: al fotobiorreactor 2 observem dos pics on l'eliminació no es tan alta.

L'eliminació d'amoni ha estat del 92,50 %, 88,03% i 93,11%, respectivament, en els fotobiorreactors 1, 2 i 3. Amb aquests resultats, podem afirmar que l'eliminació d'amoni als fotobiorreactors és molt efectiva: elimina gairebé el total de nitrogen amoniacal.

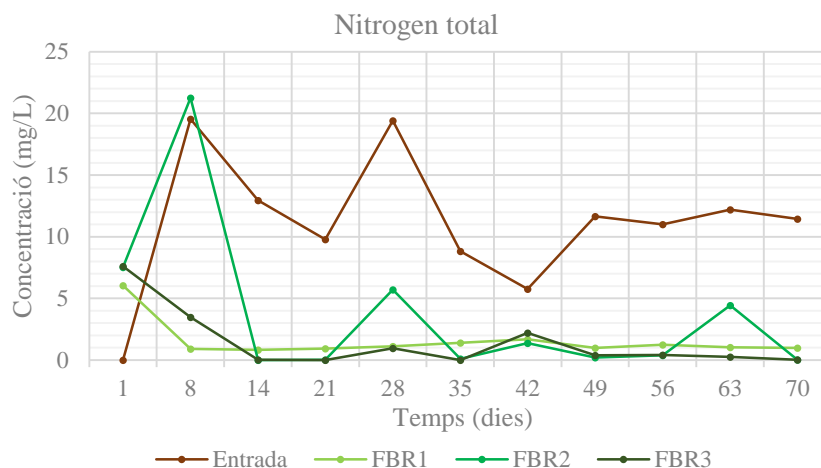


Figura 5.6.5. Nitrogen total (suma de amoni, nitrats i nitrats) a l'Entrada i a cadascun dels fotobiorreactors

En aquesta ultima *Figura 5.6.5* s'hi veu representat el nitrogen total, essent així una suma de l'amoni, dels nitrats i dels nitrats. Segueix un patró molt similar a l'evolució de l'amoni amb algunes petites variacions provocades pels nitrats.

5.7. Terbolesa

La terbolesa és una mesura indirecta de la quantitat de biomassa present en l'aigua, mitjançant la qual veiem reflectida la concentració de microalgues. Aquesta concentració es veu incrementada a mesura que augmenten les algues. A la *Figura 5.7.1* podem observar els valors obtinguts durant el mostreig.

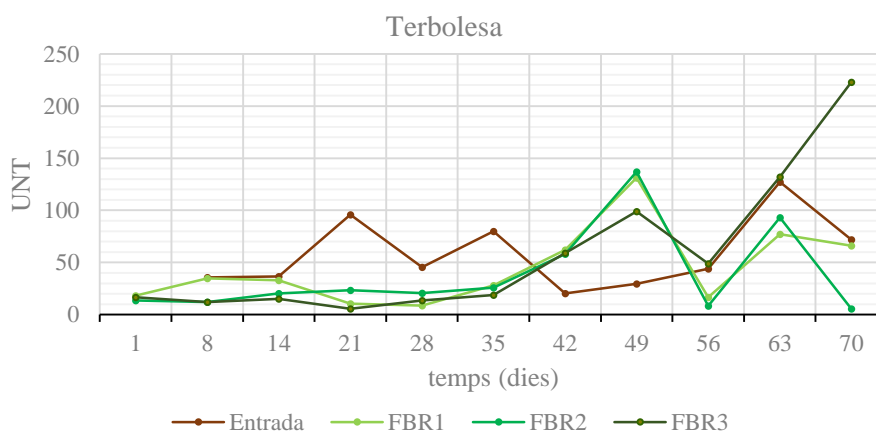


Figura 5.7.1. Terbolesa a l'entrada, FBR1, FBR2 i FB3

Els primers dies de la posada en marxa de la planta pilot, observem una menor terbolesa: per sota de la mostra d'entrada. A mida que avancen els dies, aquesta concentració va augmentant

a poc a poc. El fotobiorreactor 3 és el que té un augment més gran i una evolució més significativa pel que fa a la producció de microalgues.

A continuació, juntament amb l'anàlisi dels sòlids, podem veure a la *Figura 5.8.7*, *Figura 5.8.8*, *Figura 5.8.9* i *Figura 5.8.10* una correlació de sòlids en suspensió totals i terbolesa.

5.8. Sòlids en suspensió (SST/SSV)

L'anàlisi dels sòlids en suspensió totals és un indicatiu de la biomassa existent a la nostra mostra d'aigua. Per altra banda, els sòlids en suspensió volàtils ens indiquen la quantitat de matèria inorgànica que contenen aquests sòlids. Així, la diferència entre els sòlids totals i els volàtils ens indica la matèria orgànica en suspensió existent a la mostra.

A la següent gràfica, *Figura 5.8.1*, es veu l'evolució dels sòlids en suspensió totals, i a la que ve a continuació, *Figura 5.8.2*, l'evolució dels sòlids en suspensió volàtils.

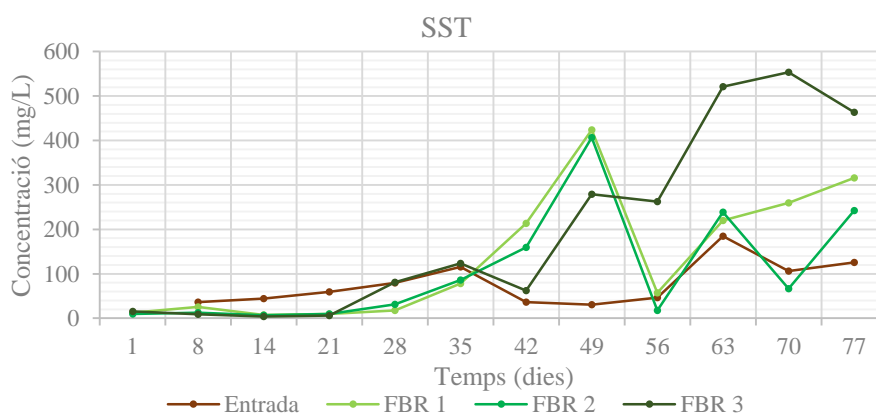


Figura 5.8.1. Sòlids en suspensió totals a l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3

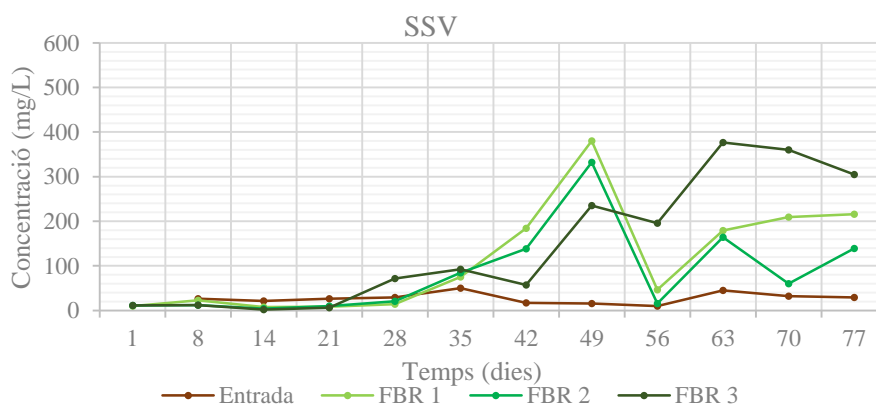


Figura 5.8.2. Sòlids en suspensió volàtils a l'entrada, FBR1, FBR2 i FBR3

Per tal de poder comparar els resultats més còmodament, a les següents gràfiques observem els resultats de sòlids en suspensió volàtils i totals en una mateixa gràfica per a cadascuna de les mostres.

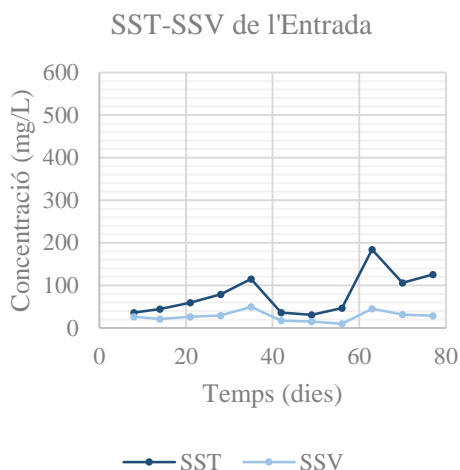


Figura 5.8.3. SST i SSV a l'Entrada

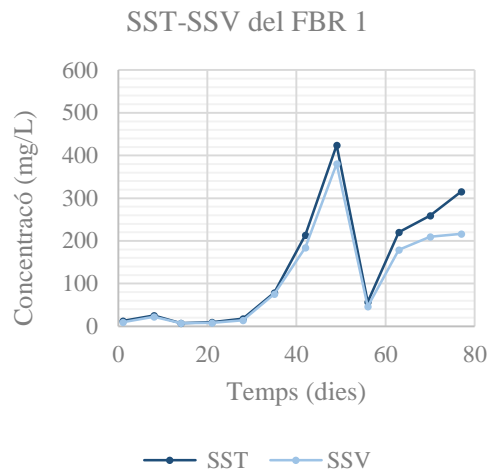


Figura 5.8.4. SST i SSV al FBR 1

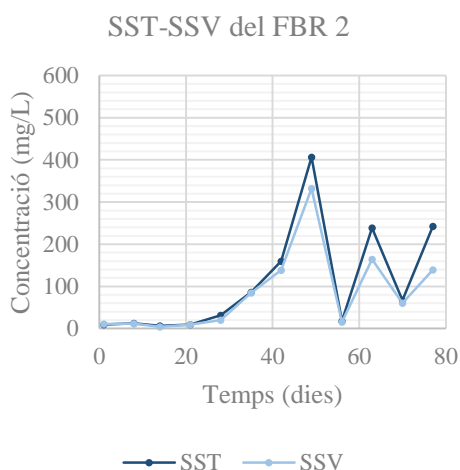


Figura 5.8.5. SST i SSV al FBR 2

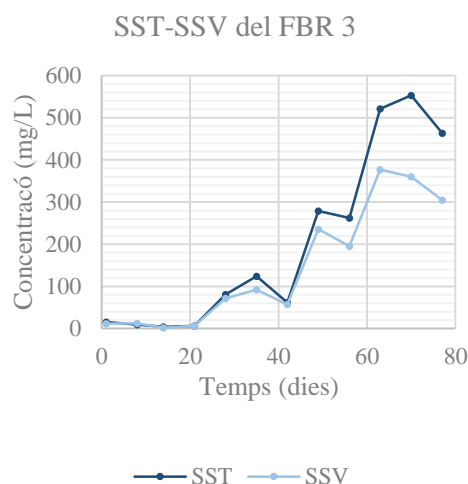


Figura 5.8.6. SST i SSV al FBR 3

Metcalf i Eddy 2003, marquen una concentració dèbil amb un valor de 120 mg L^{-1} per a SST i 95 mg L^{-1} per a SSV. Pel que fa a l'Entrada del sistema, *Figura 5.8.3*, podem observar que el valor de SST el dia 63 de funcionament és superior i el dia 35 i 77 està poc per sobre, però tota la resta de dies es mantenen dins els límits acceptables. Els valors de SSV es mantenen durant tot l'assaig per sota del valor límit. D'altra banda, observem irregularitats en l'entrada sense cap lògica en l'evolució temporal.

En canvi, en el comportament dels fotobiorreactors sí que podem observar un augment de concentracions amb el pas del temps, tant de sòlids en suspensió totals com volàtils degut a l'augment de població de microalgues dels fotobiorreactors. I, en ambdós casos, amb valors per sobre dels límits acceptables (Metcalf i Eddy, 2003).

Tant en fotobiorreactor 1 com el 2, podem observar un augment considerable tant de sòlids en suspensió totals com volàtils, el dia 49. Això és degut al fet que aquell cap de setmana

es va aturar el sistema elèctric que permet les entrades i sortides d'aquests circuits. En aquests dos circuits podem observar forces irregularitats al llarg del temps, sobretot en el fotobiorreactor 2, això bàsicament va ser degut a fallades tècniques del funcionament del sistema.

Així mateix, observem una evolució molt més lògica en el fotobiorreactor 3, amb un augment gradual tant de sòlids en suspensió totals com volàtils degut al creixement dels microorganismes. En aquest circuit gairebé no tenim incidències tècniques anotades.

Al llarg del mostreig, observem que els sòlids en suspensió volàtils dels fotobiorreactors es mantenen semblants als totals (amb les respectives variacions), fet que ens indica que hi ha una composició similar de microorganismes, matèria orgànica, etc.

Si fem una relació entre SSV i SST obtenim un percentatge que ens mostra el grau de semblança, on a l'entrada aquests valors són molt més baixos, amb una mitjana del 39,85% a l'entrada, 84,74%, 81,98% i 80,99%, respectivament a cadascun dels fotobiorreactors.

Com s'ha comentat amb la terbolesa, a continuació observem quatre gràfiques (*Figura 5.8.7.*, *Figura 5.8.8.*, *Figura 5.8.9.* i *Figura 5.8.10.*) on hi ha una correlació entre la terbolesa i els SST en cada punt de mostreig. En cadascuna de les gràfiques també s'hi mostra el coeficient de correlació, amb un bon resultat sobretot a les mostres dels fotobiorreactors. Aquest resultat es tradueixen amb una mateixa tendència de creixement. També confirma que la terbolesa es pot utilitzar com a mesura indirecta de la biomassa.

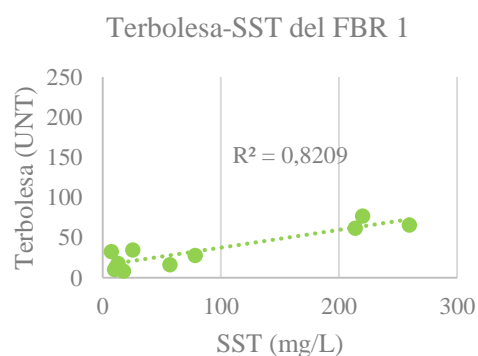
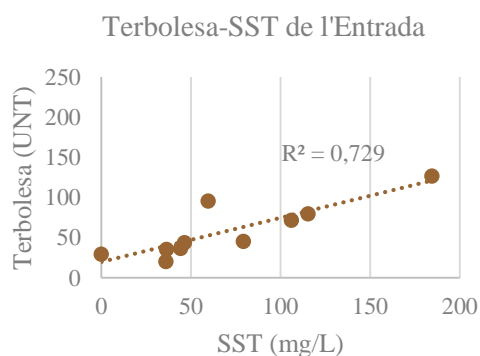


Figura 5.8.7. Correlació Terbolesa-SST a l'Entrada **Figura 5.8.8.** Correlació Terbolesa-SST al FBR 1

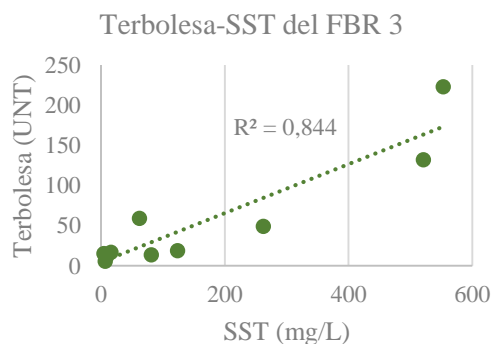
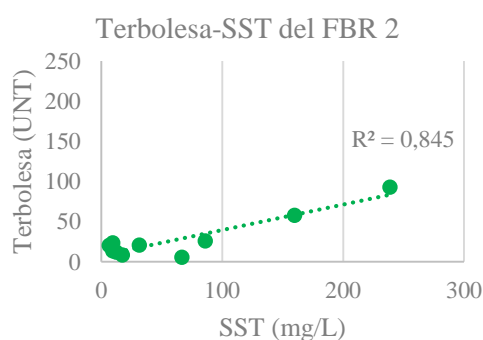


Figura 5.8.9. Correlació Terbolesa-SST al FBR 2 **Figura 5.8.10.** Correlació Terbolesa-SST al FBR 3

5.9. Producció de biomassa

Per completar la discussió dels resultats dels sòlids, s'ha fet un càlcul de la producció de biomassa (Figura 5.9.1.) a partir dels SSV amb la següent fórmula:

$$\text{Producció de Biomassa} = \frac{Q * SSV}{V}$$

On Q és el cabal ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$), SSV és la concentració de biomassa en el fotobiorreactor (mg L^{-1}) i V (m^3) és el volum de fotobiorreactor. El cabal d'entrada dels fotobiorreactors és d'1 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ i el Volum del fotobiorreactor de 10 m^3 .

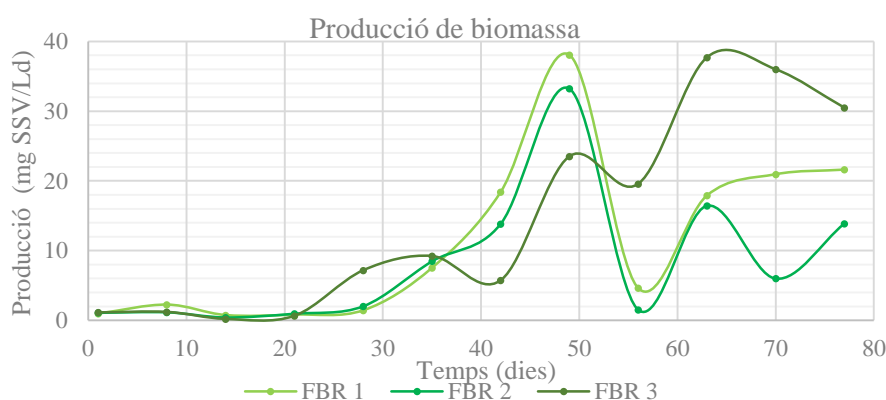


Figura 5.9.1. Producció de biomassa en cadascun dels fotobiorreactors

A partir del dia 21 de funcionament, podem observar que la biomassa comença a augmentar, i aproximadament el dia 42 aquest increment comença a ser més significatiu. Pel que fa al fotobiorreactor 3, aquest creixement no s'atura i no fa cap descens considerable, com és el cas dels altres fotobiorreactors a partir del dia 49 de funcionament (a causa d'incidències tècniques de la planta pilot). Tots els fotobiorreactors assoleixen en algun moment un creixement superior a 30 $\text{mg SSV L}^{-1}\text{d}^{-1}$.

De totes maneres, després del dia 49, s'intueix un ascens en l'augment de biomassa en els fotobiorreactors 1 i 2, per tant el funcionament d'aquests és correcte.

En el període final d'estudi, el creixement de la biomassa del fotobiorreactor 3 arriba fins a valors gairebé de 0,040 $\text{g SSV L}^{-1}\text{d}^{-1}$, valors de l'ordre que s'han obtingut en altres estudis de cultiu de microalgues amb aigua residual, 0,05 $\text{g SSV L}^{-1}\text{d}^{-1}$ (Arias et al., 2013) o 0,03-0,04 $\text{g SSV L}^{-1}\text{d}^{-1}$ (Viruela et al., 2016).

L'augment de biomassa ens indica que l'efluent d'entrada dels fotobiorreactors proporciona una alimentació adequada pel creixement fotosintètic.

Un dels principals inconvenients d'anàlisi a destacar durant els primers dies de funcionament, sobretot un cop analitzats els resultats, és la creació de biofilm a les parets dels fotobiorreactors. Un cop ens vam adonar de la problemàtica que podria causar això amb els resultats, degut al fet que sortien molt distorsionats de la realitat, vam començar a rascar i a

moure diàriament les parets del fotobiorreactor per tal de tenir una mostra d'aigua homogènia amb la biomassa realment formada.

5.10. Clorofil·la a

La clorofil·la és un altre paràmetre que permet aproximar la biomassa algal present al cultiu mitjançant els pigments característics procedents de les algues verdes, que són responsables de fer la fotosíntesi. A la *Figura 5.10.1* observem els valors obtinguts experimentalment.

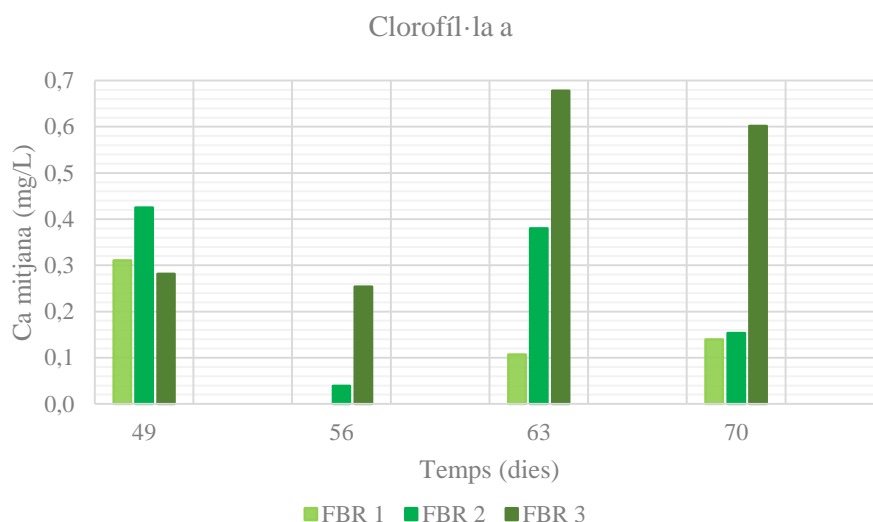


Figura 5.10.1. Clorofil·la al fotobiorreactor 1, 2 i 3

En aquest cas, només s'han tingut en compte les mostres de dins de cadascun dels fotobiorreactors.

Com podem observar, la gràfica comença al dia 49 de funcionament de la planta pilot, això és degut al fet que els primers dies de mostreig hi va haver errors durant l'anàlisi, a part del problema de creació de biofilm mencionat anteriorment.

En el fotobiorreactor 1 hi ha una concentració molt baixa de biomassa, en alguns casos nul·la, degut al mal funcionament general del sistema a partir del dia 49, com ja hem pogut anar deduint al llarg d'alguns resultats. En el fotobiorreactor 2, tot i que una mica més alta, també hi ha una producció de biomassa molt baixa i no indicativa d'un bon funcionament. En canvi, en el fotobiorreactor 3 ja trobem una concentració més acceptable pel que fa al funcionament.

Tal com passava entre la terbolesa i els SST, en què hi havia una correlació, passa el mateix entre la terbolesa i la clorofil·la i els SST i la clorofil·la. Com que ja s'ha explicat que la producció de la biomassa està directament relacionada amb els SST, a major concentració de clorofil·la a, major concentració de biomassa d'algues. A la següent gràfica ho podem observar.

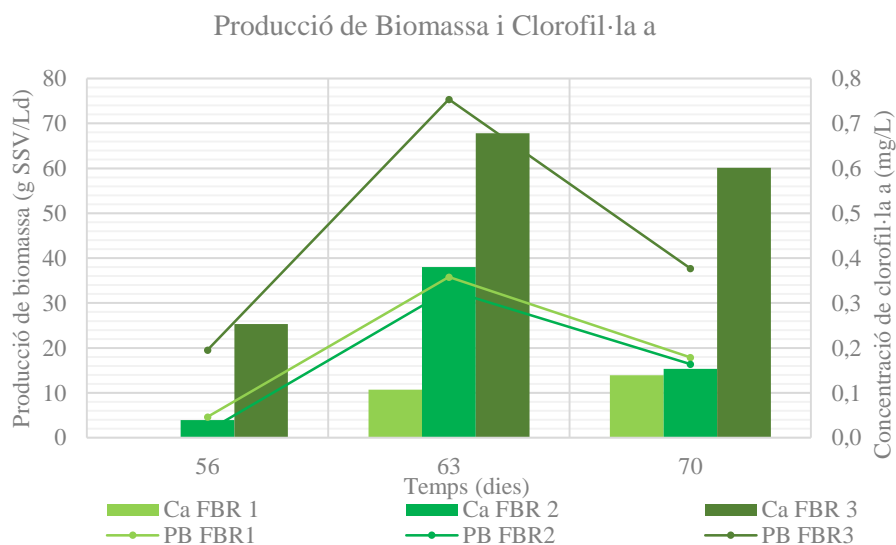


Figura 5.10.2. Comparació clorofil·la a i producció de biomassa en els fotobiorreactors

5.11. Taula resum de resultats

En aquest últim apartat dels resultats, podem observar unes taules resum de tots els resultats anteriors, separada entre Entrada i Fotobiorreactors i en diferents períodes. La selecció de cianobacteris està estrictament influenciada per la mescla d'aigua residual i domèstica de l'entrada, tal com podem veure a la *Taula 5.11.1*. Aquesta taula, com podem veure, està diferenciada en dos períodes que donen lloc a diferents característiques dels fotobiorreactors a la *Taula 5.11.2* i *Taula 5.11.3*. Hem de tenir en compte que gran part del funcionament del sistema està determinat pel correcte funcionament de la planta i que, en estudiar la posada en marxa d'aquesta planta, s'observen molts contratemps.

Cada període consta del mostreig de 5 setmanes i, en general, en les diferents anàlisis observem una millora de funcionament a partir del segon període.

Taula 5.11.1. Mitjana (desviació estàndard) dels paràmetres principals de la mescla d'entrada als fotobiorreactors durant dos períodes de l'experiment

Paràmetre	Període 1		Període 2	
	Mitjana	Rang	Mitjana	Rang
pH	8,22 (0,19)	8,00-8,47	8,42 (0,31)	8,08-8,78
SST (mg L⁻¹)	67,04 (31,59)	36,50-115,39	80,69 (65,36)	30,67-184,44
SSV (mg L⁻¹)	30,50 (11,14)	21,00-49,67	23,71 (14,42)	9,50-44,89
TAN^a (mg L⁻¹)	4,83 (4,12)	0,59-9,98	2,73 (2,66)	0,11-6,13
N-NO₂⁻ (mg L⁻¹)	1,08 (1,01)	<LOQ-2,12	0,83 (1,86)	<LOQ-4,15
N-NO₃⁻ (mg L⁻¹)	9,33 (1,77)	7,15-11,65	7,46 (2,36)	5,30-11,36
PO₄³⁻ (mg L⁻¹)	5,02 (3,06)	<LOQ-7,18	<LOQ	<LOQ

^a TAN: Amoni total

Període 1: del dia 8 al 35 de funcionament de la planta pilot (03.05.2017-30.05.2017)

Període 2: del dia 42 al 70 de funcionament de la planta pilot (06.06.2017-04.07.2017)

Taula 5.11.2. Mitjana (desviació estàndard) dels paràmetres principals del fotobiorreactor durant el primer període de l'experiment

PERÍODE 1						
Paràmetre	FBR 1		FBR 2		FBR 3	
	Mitjana	Rang	Mitjana	Rang	Mitjana	Rang
Temperatura (°C)	24,60 (2,08)	22,40-27,00	24,43 (2,06)	22,40-26,90	24,78 (2,24)	22,50-27,40
pH	10,15 (0,70)	9,03-10,75	10,17 (0,39)	9,79-10,82	10,10 (0,56)	9,28-10,80
SST (mg L⁻¹)	27,64 (29,14)	7,17-78,19	29,17 (33,24)	6,50-86,00	44,82 (54,57)	4,17-123,62
SSV (mg L⁻¹)	25,55 (28,43)	7,50-75,24	26,15 (33,27)	4,33-84,76	36,91 (41,97)	2,00-376,97
Producció de biomassa (mg SSV L⁻¹ d⁻¹)	2,55 (2,84)	0,75-7,52	2,62 (3,33)	0,43-8,48	3,69 (4,20)	0,20-9,23
TAN^a (mg L⁻¹)	0,04 (0,04)	<LOQ-0,10	0,23 (0,30)	<LOQ-0,74	0,02 (0,01)	<LOQ-0,04
N-NO₂⁻ (mg L⁻¹)	<LOQ	<LOQ	1,95 (3,56)	<LOQ-8,21	0,34 (0,77)	<LOQ-1,71
N-NO₃⁻ (mg L⁻¹)	1,00 (0,21)	0,82-1,33	3,29 (5,58)	<LOQ-12,88	0,54 (0,79)	<LOQ-1,75
PO₄³⁻ (mg L⁻¹)	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ

^aTAN: Amoni total

Període 1: del dia 8 al 35 de funcionament de la planta pilot (03.05.2017-30.05.2017)

Taula 5.11.3. Mitjana (desviació estàndard) dels paràmetres principals del fotobiorreactor durant el primer període de l'experiment

PERÍODE 2						
Paràmetre	FBR 1		FBR2		FBR 3	
	Mitjana	Rang	Mitjana	Rang	Mitjana	Rang
Temperatura (°C)	25,38 (1,12)	24,30-27,20	25,34 (1,07)	24,30-27,10	25,60 (0,83)	24,80-26,90
pH	10,24 (0,58)	9,27-10,67	10,30 (0,50)	9,46-10,67	10,11 (0,40)	9,68-10,62
SST (mg L⁻¹)	234,80 (131,03)	56,89-423,89	177,87 (153,73)	17,33-406,67	335,56 (203,24)	62,00-553,33
SSV (mg L⁻¹)	199,82 (191,41)	46,22-380,56	142,09 (121,93)	15,33-332,22	245,02 (130,77)	57,33-376,97
Producció de biomassa (mg SSV L⁻¹ d⁻¹)	19,98 (11,94)	4,62-38,06	14,21 (12,19)	1,53-33,22	24,50 (13,08)	5,73-37,70
Clorofil·la a (mg L⁻¹)	0,19 (0,11)	0,11-0,31	0,25 (0,18)	0,04-0,42	0,45 (0,22)	0,25-0,68
TAN^a (mg L⁻¹)	0,19 (0,21)	0,03-0,52	0,40 (0,47)	0,03-1,17	0,28 (0,24)	0,01-0,52
N-NO₂⁻ (mg L⁻¹)	<LOQ	<LOQ	0,71 (1,58)	<LOQ-3,53	<LOQ	<LOQ
N-NO₃⁻ (mg L⁻¹)	1,05 (0,35)	0,82-1,66	0,27 (0,60)	<LOQ-1,35	0,44 (0,98)	<LOQ-2,20
PO₄³⁻ (mg L⁻¹)	<LOQ (<LOQ)	<LOQ-<LOQ	<LOQ (<LOQ)	<LOQ-<LOQ	<LOQ (<LOQ)	<LOQ-<LOQ

^aTAN: Amoni total

Període 2: del dia 42 al 70 de funcionament de la planta pilot (06.06.2017-04.07.2017)

A partir del segon període de funcionament, podem observar que la biomassa augmenta molt: de valors que van de 9,50-44,89 mg SSV L⁻¹ fins a valors que van de 46,22-380,56 mg SSV L⁻¹ en el fotobiorreactor 1, de 15,33-332,22 mg SSV L⁻¹ al fotobiorreactor 2 i de 57,33-376,97 mg SSV L⁻¹ al fotobiorreactor 3. Aquest augment més considerable s'aconsegueix aproximadament

el dia 42 de funcionament de la planta pilot, tot i que en el període 1 també es pot observar un petit augment de la biomassa. Aquest augment de la biomassa ens indica que l'efluent d'entrada dels fotobiorreactors proporciona una alimentació adequada pel creixement fotosintètic. En un estudi similar a la selecció de cianobacteris consultats en la bibliografia, podem observar que s'aconsegueixen creixements similars. Tot i que l'experiment és molt diferent, ja que està fet a escala de laboratori i cada període és de 50 a 90 dies, el primer període s'observen 410 mg SSV L⁻¹, el segon 860 mg SSV L⁻¹ i el tercer 230 mg SSV L⁻¹ amb una entrada de 240 mg SSV L⁻¹, en la planta pilot aquest creixement és similar en aproximadament una setmana, però amb una biomassa d'entrada de gairebé 10 vegades inferior (Arias et al., 2017).

Pel que fa a la concentració TAN (Amoni total) a l'entrada als fotobiorreactors té una concentració mitjana de 4,83 mg L⁻¹ en el període 1, amb un mínim de 0,59 i un màxim de 9,98, i en el període 2 hi ha una concentració mitjana de 2,73 mg L⁻¹, amb un mínim de 0,11 i un màxim de 6,13 mg L⁻¹. Observem moltes irregularitats en l'entrada amb una desviació estàndard dels resultats molt gran, com podem veure a la *Taula 5.11.1*. Això és degut al fet que l'entrada de nutrients, tant del canal amb aigua agrícola com de l'aigua residual domèstica, no és constant. Aquests valors d'entrada d'amoni al sistema, tot i no ser molt baixos, són inferiors a altres estudis similars.

La concentració d'ortofosfats, P-PO₄³⁻, durant el primer període és de 5,02 mg L⁻¹ amb un màxim de 7,18 mg L⁻¹ i un mínim inferior al mínim de detecció de la corba de detecció (<LOQ), tal com podem veure a la *Taula 5.9.1*. No podem determinar l'eliminació del fòsfor amb cap exactitud perquè la majoria de valors d'aquest, tant el de l'entrada durant el segon període i a tots els fotobiorreactors en els dos períodes, estan per sota del mínim de detecció.

De totes maneres, sabem que el fòsfor és un dels nutrients més importants pel creixement de les algues i el seu contingut en la biomassa varia de 0,05% fins a 3,3% (Grobbelaar, 2004). El fòsfor és un component de moltes molècules essencials pel metabolisme de les microalgues. Tot i que sabem que, perquè es produeixi el creixement d'algues en els fotobiorreactors, hi ha d'haver un mínim de fòsfor, aquest podria ser un factor limitant en les microalgues, com ho és especialment en entorns naturals (Oliver i Ganf, 2000).

De totes maneres, hi ha estudis anteriors sobre l'adaptació dels cianobacteris a concentracions de P baixes (Kamilya et al., 2006, Renuka et al., 2012, Su et al., 2012). Altres estudis diuen que les cianobacteris també creixen a concentracions elevades ja que tenen una gran capacitat d'adaptació. Sigui com sigui, en aquestes circumstàncies també creixen algues verdes i no hi pot haver una selecció.

5.12. Evolució del cultiu de microalgues, Microscòpia

A continuació, es podran veure les fotografies fetes amb el microscopi òptic per veure l'evolució dels cultius de microalgues i amb el microscopi de fluorescència per poder observar els cianobacteris fàcilment. Primer es descriuran breument els microorganismes que es poden veure i a continuació una sèrie de fotografies de com va evolucionant el cultiu de microalgues.

La majoria de les fotografies estan fetes a mostres recollides a l'interior dels fotobiorreactors i alguna a l'entrada i a l'inòcul introduït a l'inici de l'experiment. Aquesta informació s'indicarà al peu de cada figura.

- *Diatomea*: de nom científic *Bacillariophyceae*, són una classe d'algues unicel·lulars microscòpiques, encara que rarament formen colònies. Són microorganismes fotosintètics que viuen en aigua dolça o marina i formen una part important del fitoplàncton. Un dels trets característics d'aquestes cèl·lules és la presència d'una coberta de sílice, anomenat *frústul*, generalment format per dues parts asimètriques amb una forma allargada.

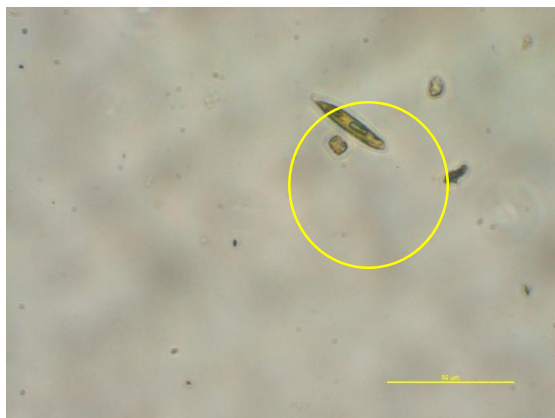


Figura 5.12.1. Mostra del FBR1, microscopi òptic (24/05/2017, Aura Vidal)

- *Algues verdes*: de nom científic *Chlorophyta*, se'n coneixen 8000, la majoria d'aigua dolça i moltes són unicel·lulars. Tenen pigments assimiladors al cloroplast, com la clorofil·la a i b, β -carotè i xantofil·les, a més de substàncies de reserva com el midó. La presència de clorofil·la els dona el color verd intens i, al microscopi, a vegades es pot veure un lleuger color marró.

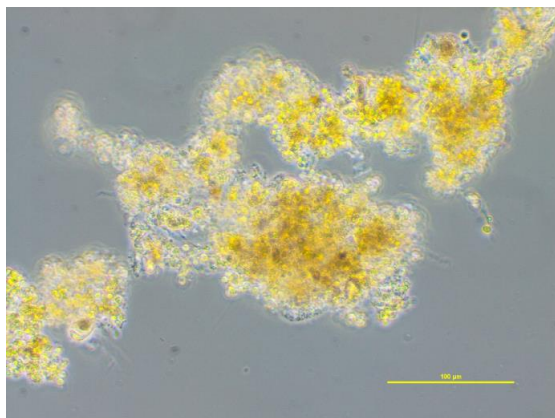


Figura 5.12.2. Mostra de l'inòcul, microscopi òptic (27/04/2017, Aura Vidal)

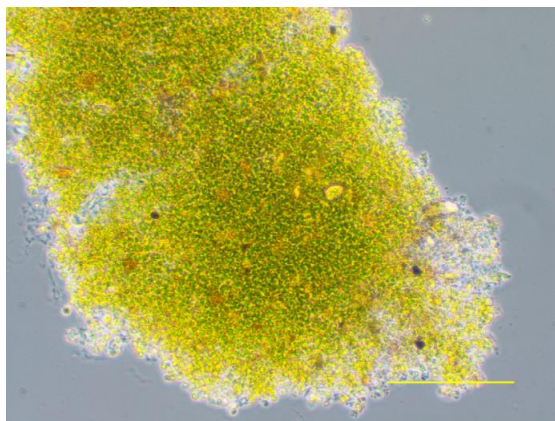


Figura 5.12.3. Mostra del FBR2, microscopi òptic (27/04/2017, Aura Vidal)

- *Scenedesumus*: és un gènere d'algues verdes de la classe *Chlorophyceae*. Són organismes colonials i sense mobilitat que viuen en aigua dolça. S'utilitzen per obtenir bioproteïnes.

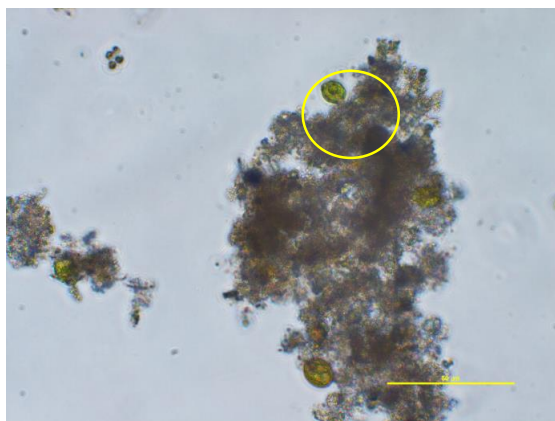


Figura 5.12.4. Mostra de l'entrada, microscopi òptic (10/05/2017, Aura Vidal)

CIANOBACTERI:

- *Chroococcus*: són un tipus de cianobacteris, els quals, en la majoria de casos, formen colònies microscòpiques, normalment formades per 2, 4, 6 o 8 nuclis. Rarament es troben en forma cel·lular única, ja que es reproduïxen mitjançant la divisió de la cèl·lula en dues parts. Es troben envoltades per una capa incolora, anomenada *vaina*. Són de color verd clar.

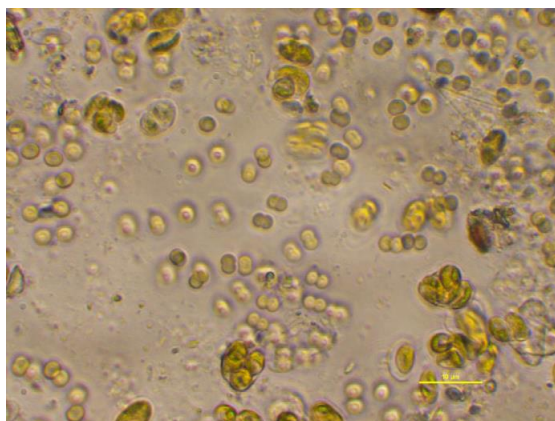


Figura 5.12.5. Mostra del FBR3, microscopi òptic (07/06/2017, Aura Vidal)

- *Oscillatoria*: Es tracta d'un bacteri gramnegatiu filamentós d'aigua dolça, format per cèl·lules separades per septes. Antigament s'anomenaven algues blaves i contenen clorofil·la, carotens i uns pigments hidrosolubles específics, les ficocianines.



Figura 5.12.6. Mostra FBR3, microscopi òptic (24/05/2017, Aura Vidal)

Podem veure una seqüència temporal de fotografies fetes a cadascun dels fotobiorreactors per tal d'avaluar la població dels cianobacteris presents a l'aigua, que, com ja s'ha comentat a la introducció, són importants en la continuació i totalitat del projecte, en el qual es busca una producció majoritària de cianobacteris per a l'obtenció de bioplàstics.

I per últim una foto de cadascun dels fotobiorreactors de l'últim dia de mostreig, feta amb el microscopi de fluorescència.

- Fotobiorreactor 1, microscopi òptic

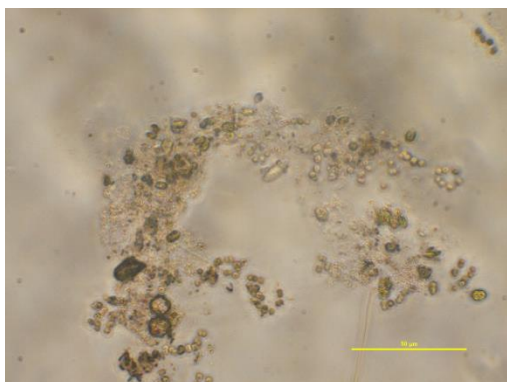


Figura 5.12.7. FBR1, M.O., 17/05/2017

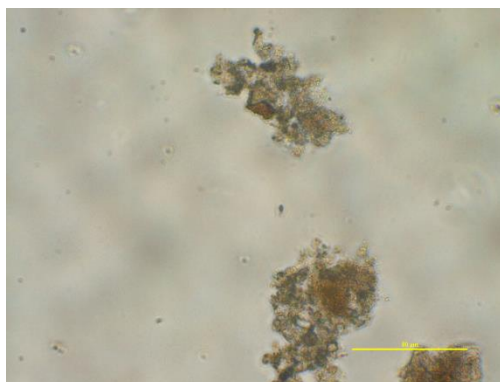


Figura 5.12.8. FBR1, M.O., 24/05/2017

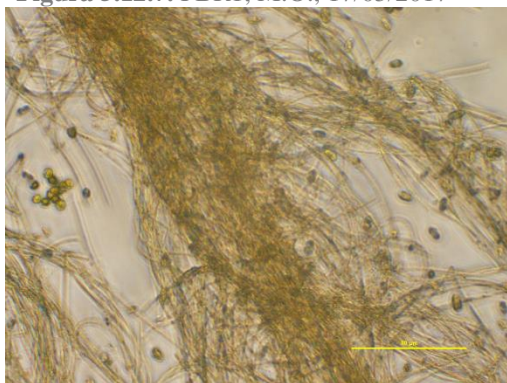


Figura 5.12.9. FBR1, M.O., 31/05/2017

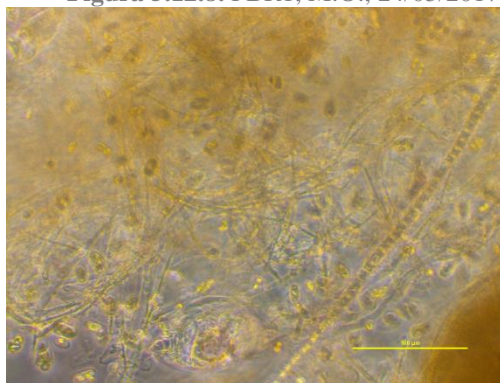


Figura 5.12.10. FBR1, M.O., 07/06/2017

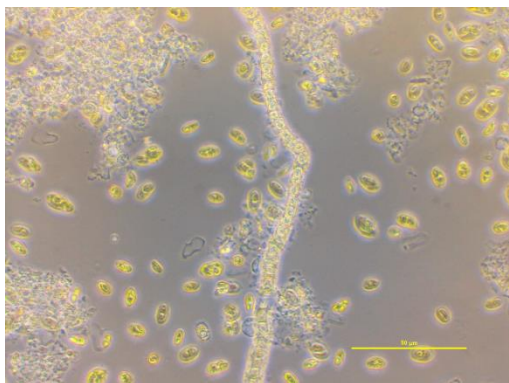


Figura 5.12.11. FBR1, M.O., 14/06/2017

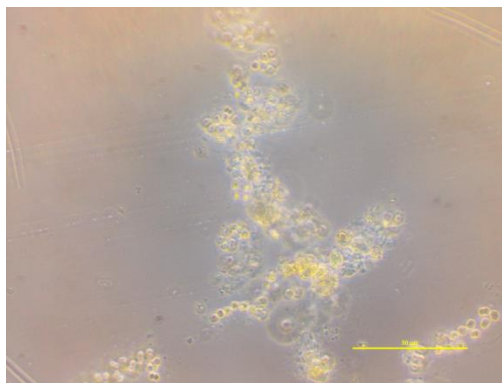


Figura 5.12.12. FBR1, M.O., 28/06/2017

- Fotobiorreactor 2, microscopi òptic

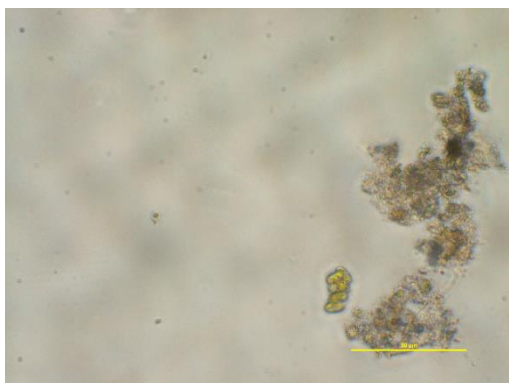


Figura 5.12.13. FBR2, M.O., 24/05/2017



Figura 5.12.14. FBR2, M.O., 31/05/2017

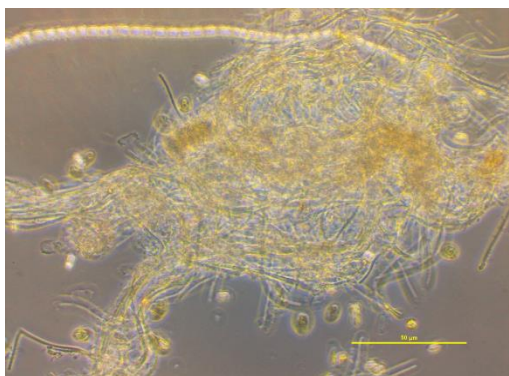


Figura 5.12.15. FBR2, M.O., 07/06/2017

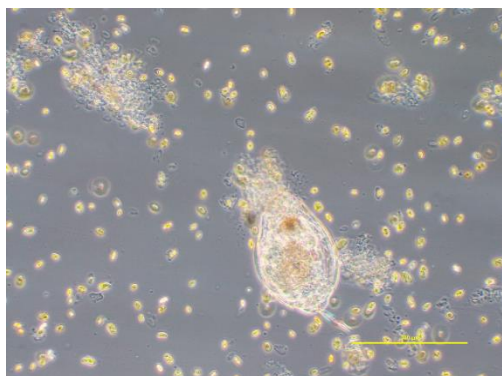


Figura 5.12.16. FBR2, M.O., 14/06/2017

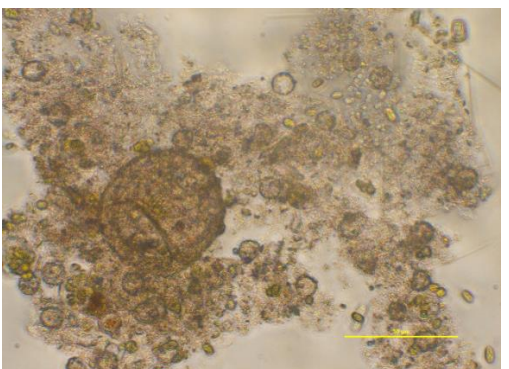


Figura 5.12.17. FBR2, M.O., 28/06/2017

- **Fotobiorreactor 3, microscopi òptic**

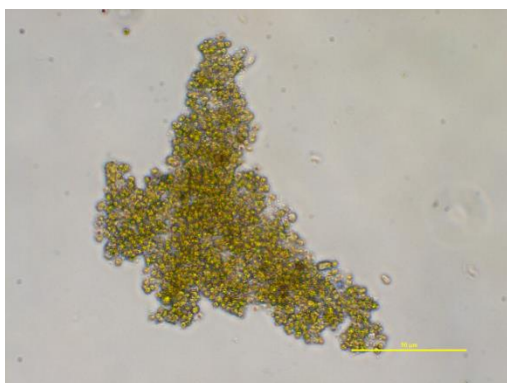


Figura 5.12.18. FBR3, M.O., 27/04/2017

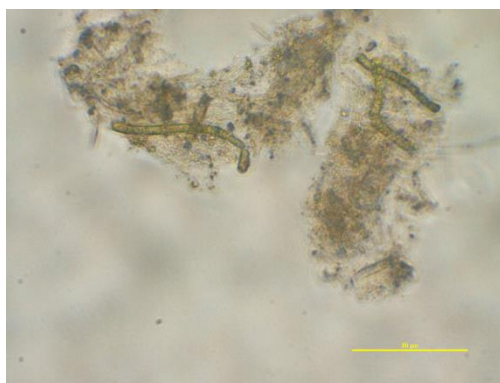


Figura 5.12.19. FBR3, M.O., 17/05/2017



Figura 5.12.20. FBR3, M.O., 24/05/2017

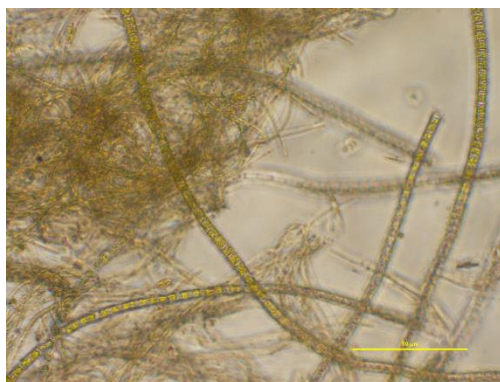


Figura 5.12.21. FBR3, M.O., 31/05/2017

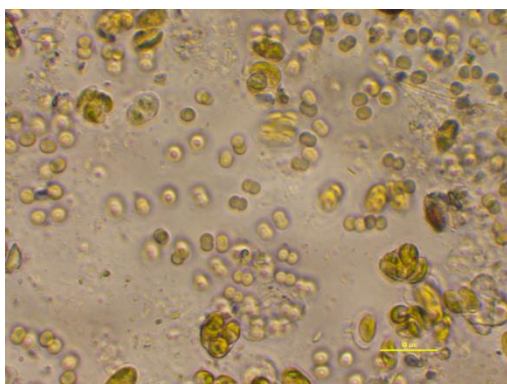


Figura 5.12.22. FBR3, M.O., 07/06/2017

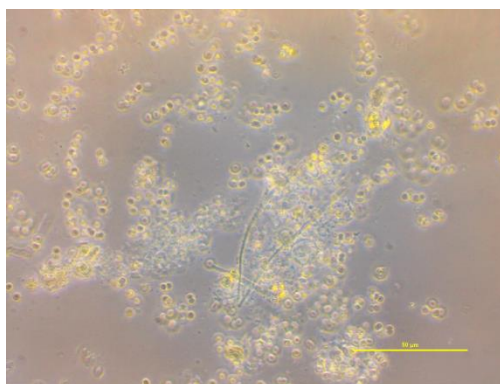


Figura 5.12.23. FBR3, M.O., 14/06/2017

Amb les fotografies mostrades, observem que al fotobiorreactor 1 gairebé no hi ha presència de cianobacteris i hi ha moltes algues verdes i *scenedesmus* com a competidors. Al fotobiorreactor 2 pràcticament tampoc es poden veure cianobacteris degut als mateixos competidors que al fotobiorreactor 1. A la Figura 5.12.16. hi podem veure clarament com un rotífer s'està alimentant de les microalgues.

A diferència, en el fotobiorreactor ja des del mostreig del 24/05/2017 (28è dia de funcionament de la planta pilot) hi podem observar força concentració de cianobacteris. En els

últims dies de mostreig aquesta concentració augmenta, obtenint així una població majoritària de cianobacteris.

- **Fotobiorreactor 1, 2 i 3, microscopi de fluorescència**

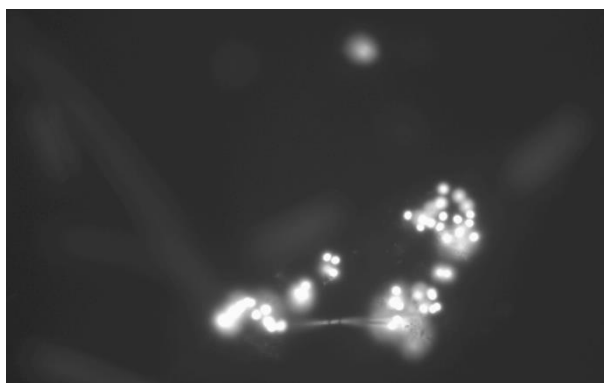


Figura 5.12.24. Mostra FBR1 microscopi fluorescència (05/07/2017, Aura Vidal)

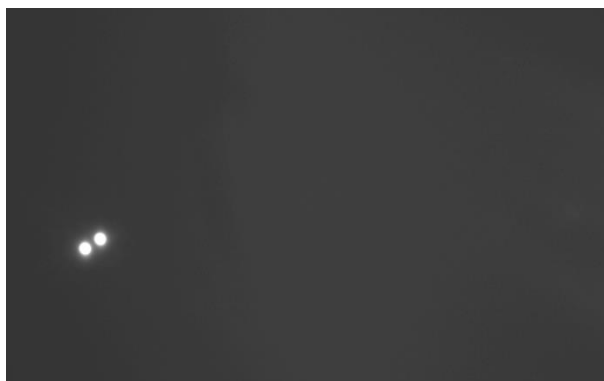


Figura 5.12.25. Mostra FBR2, microscopi fluorescència (05/07/2017, Aura Vidal)

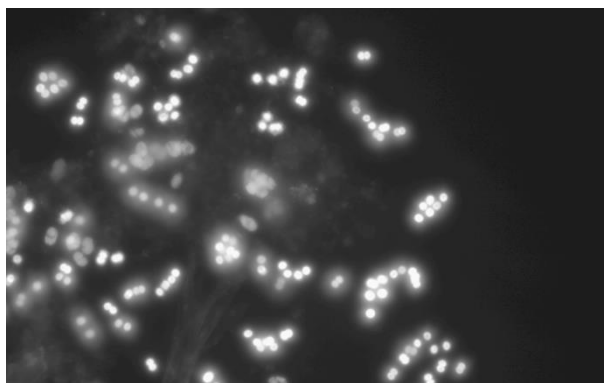


Figura 5.12.26. Mostra FBR3 microscopi fluorescència (05/07/2017, Aura Vidal)

Aquestes últimes 3 fotografies fetes amb el microscopi de fluorescència, corresponen a l'últim dia de mostreig i es pot veure clarament una presència de cianobacteris molt superior al fotobiorreactor 3.

6. CONCLUSIONS

S'ha aconseguit construir i posar en marxa la planta pilot i s'ha assolit, al final dels 2 mesos d'estudi, un bon funcionament de les instal·lacions.

Respecte el tractament de l'aigua residual:

- L'eliminació de N s'ha aconseguit en un grau desitjable als tres fotobiorreactors amb una eliminació de l'amoni molt elevada, superior al 88% en tots els casos.
- L'eliminació del fòsfor ha sigut total.
- No s'ha observat eliminació de la matèria orgànica de l'aigua residual.

Respecte la selecció de cianobacteris:

- S'observa un augment de la biomassa a l'aigua residual en tots els fotobiorreactors i en major concentració al fotobiorreactor 3. Aquesta dominància pot ser conseqüència d'un pH amb uns valors molt alts i d'una concentració de fòsfor molt baixa.
- Al fotobiorreactor 3, a finals del primer mes de funcionament, s'observa una concentració important de cianobacteris, obtenint així, els últims dies, una població majoritària.

Així doncs, els resultats obtinguts indiquen que, sense incidències tècniques, aquests tipus de fotobiorreactors podrien assolir els objectius de reducció de nutrients d'aigües residuals i la producció de microalgues enriquides de cianobacteris.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

Abed, R.M.M., Dobretsov, S., Sudesh, K. (2009). Applications of cyanobacteria in biotechnology. *Journal of Applied Microbiology*, 106, pp. 1–12.

Alexis, H., Jose, I.L. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios Microalgae. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), pp. 157-173.

APHA-AWWA-WPCF, 2001. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (20th ed.) Washington.

Arias, D. M., Uggetti, E., García-Galán, M. J., & García, J. (2017). Cultivation and selection of cyanobacteria in a closed photobioreactor used for secondary effluent and digestate treatment. *Science of the total environment*, 587, pp. 157-167.

Beaulieu, M., Pick, F., Gregory-Eaves, I., 2013. Nutrients and water temperature are significant predictors of cyanobacterial biomass in a 1147 lakes data set. *Limnology Oceanography*, 58, pp. 1736–1746.

Directiva 91/271/CEE. Tratamiento de las aguas residuales urbanas. Espanya, 21 de maig del 1991.

Fuenmayor, G., Jonte, L., Rosales-Loaiza, N. and Morales, E. (2009). Crecimiento de la cianobacteria marina *Oscillatoria* sp. MOF-06 en relación al pH en cultivos discontinuos. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 29(1).

Grobbelaar, J.U. (2004). En: Richmond, A. (Ed.), Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, pp. 97-115.

Heinz, S., Dieter, K. (1987). Atlas de los Microorganismos de Agua Dulce. España, Barcelona. *Omega*.

Kamilya, D., Sarkar, S., Maiti, T., Bandyopadhyay, S. and Mal, B. (2006). Growth and nutrient removal rates of *Spirulina platensis* and *Nostoc muscorum* in fish culture effluent: a laboratory-scale study. *Aquaculture Research*, 37(15), pp.1594-1597.

Lapeña, M. R., & Rigola, M. (1989). Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales (Vol. 27). *Marcombo*, pp. 29.

Markou, G., Vandamme, D. and Muylaert, K. (2014). Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients. *Water Research*, 65, pp.186-202.

Mena Mas, J.F. (2010). *Method and apparatus for providing a photobioreactor*. US 9469832 B2.

Mata, T. M., Martins, A. A., Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), pp. 217-232.

Metcalf, E., Eddy, E. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. McGrawHill. Inc., New York.

Mimouni, V., Ulmann, L., Pasquet, V., Mathieu, M., Picot, L., Bougaran, G., Cadoret, J.-P., Morant-Manceau, A., Schoefs, B. (2012). The potential of microalgae for the production of bioactive molecules of pharmaceutical interest. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 13, pp. 2733–2750.

Oliver, R.L., Ganf, G.G. (2000). En: Whitton, B.A., Potts, M. (Eds.), *The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space*. Kluwer Academic Publishers, New York, pp. 149-194.

Renuka, N., Sood, A., Ratha, S.K., Prasanna, R., Ahluwalia, A.S. (2013). Evaluation of microalgal consortia for treatment of primary treated sewage effluent and biomass production. *Journal of Applied Phycology*, 25, pp. 1529–1537.

Shalaby, E., 2011. Algae as promising organisms for environment and health. *Plant Signaling & Behavior*, 6, pp. 1338–1350.

Speer, Brian R. (1997). Chlorophyll molecules are specifically arranged in and around photosystems that are embedded in the thylakoid membranes of chloroplasts. Two types of chlorophyll exist in the photosystems: chlorophyll a and b. «Photosynthetic Pigments». *UCMP Glossary (online)*. University of California Museum of Paleontology.

Solorzano, L., 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method. *Limnol. Oceanogr*, 14, pp. 799.

Su, Y., Mennerich, A., Urban, B. (2012). Comparison of nutrient removal capacity and biomass settleability of four high-potential microalgal species. *Bioresource Technology*, 124, pp. 157–162.

Viruela, A., Murgui, M., Gómez-Gil, T., Durán, F., Robles, Á., Ruano, M. V., et al. (2016). Water resource recovery by means of microalgae cultivation in outdoor photobioreactors using the effluent from an anaerobic membrane bioreactor fed with pre-treated sewage. *Bioresource technology*, 218, pp. 447-454.

ANNEXOS

Taula I. Valors de Terbolesa, pH, Conductivitat elèctrica (CE) i Temperatura de la Mostra 1, 2, 3 i 4

Terbolesa, pH, Conductivitat i Temperatura																	
Dia	Data	MOSTRA 1 - Tanc entrada				MOSTRA 2 - FBR 1				MOSTRA 3 - FBR 2				MOSTRA 4 - FBR 3			
		Terbolesa	pH	CE	T	Terbolesa	pH	CE	T	Terbolesa	pH	CE	T	Terbolesa	pH	CE	T
[-]	[-]	UNT	[-]	mS/cm	°C	[UNT]		mS/cm	°C	[UNT]	[-]	mS/cm	°C	[UNT]	[-]	mS/cm	°C
1	26/04/2017	-	-	-	-	18,08	8,41	1,68	19,7	13,66	8,40	1,71	19,4	16,83	8,39	1,85	19,3
8	3/05/2017	35,68	8,11	2,06	-	34,78	10,17	1,31	-	11,99	10,19	1,44	-	12,16	10,18	1,55	-
14	09/05/2017	36,71	8,47	2,69	22,3	32,93	9,03	1,83	22,4	20,34	9,98	1,73	22,4	15,11	9,28	1,81	22,5
21	16/05/2017	95,91	8,35	3,10	26,9	10,47	10,72	2,10	27,0	23,41	10,82	2,10	26,9	5,77	10,33	2,20	27,4
28	23/05/2017	45,50	8,15	2,40	26,3	8,74	10,75	2,20	25,6	20,79	9,79	2,20	25,3	13,52	10,80	2,40	25,8
35	30/05/2017	80,00	8,00	2,00	23,3	27,93	10,09	2,30	23,4	25,87	10,09	2,30	23,1	18,70	9,89	2,30	23,4
42	06/06/2017	20,39	8,08	1,90	20,4	62,00	10,66	2,30	27,2	58,00	10,66	2,10	27,1	59,00	9,68	2,10	26,9
49	13/06/2017	29,62	8,71	2,70	24,3	131,00	10,39	2,40	24,7	137,00	10,40	2,30	24,7	99,00	10,42	2,30	25,1
56	20/06/2017	44,15	8,33	2,39	25,6	16,67	10,67	2,45	25,2	8,48	10,67	2,37	25,2	49,02	10,62	2,33	25,3
63	27/06/2017	127,00	8,20	2,73	24,4	77,00	9,27	2,38	24,3	93,00	9,46	2,42	24,3	132,00	9,80	2,28	25,9
70	04/07/2017	72,00	8,78	2,97	24,7	66,00	10,20	3,02	25,5	5,69	10,33	2,98	25,4	223,00	10,02	2,97	24,8

Taula II. Valors Sòlids en Suspensió Totals i Volàtils de la Mostra 1

SST i SSV												
Dia	Data	MOSTRA 1 - Tanc entrada										
		Nº	V	P1	P2	P3	SST	SST m	Desv	SSV	SSV m	Desv
[-]	[-]	[-]	[mL]	[g]	[g]	[g]	[mg/L]	[mg/L]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[-]
1	26/04/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-			-		
		-	-	-	-	-	-			-		
8	03/05/17	6	200	0,12	0,12	0,12	37,50	36,50	2,18	26,00	26,17	0,76
		7	200	0,11	0,12	0,12	38,00			27,00		
		8	200	0,12	0,13	0,12	34,00			25,50		
14	9/05/17	1	200	0,14	0,15	0,14	50,50	44,33	14,29	22,50	21,00	4,92
		2	200	0,14	0,15	0,14	54,50			25,00		
		3	200	0,13	0,14	0,14	28,00			15,50		
21	16/05/17	10	200	0,14	0,15	0,15	56,00	59,67	3,18	24,50	26,17	2,08
		13	200	0,14	0,15	0,15	61,50			28,50		
		14	200	0,14	0,15	0,15	61,50			25,50		
28	23/5/17	1	200	0,16	0,17	0,17	68,50	79,33	15,83	27,50	29,50	1,73
		2	200	0,15	0,16	0,16	72,00			30,50		
		3	200	0,15	0,17	0,17	97,50			30,50		
35	30/05/17	7	200	0,14	0,16	0,15	113,50	115,39	1,67	49,00	49,67	2,08
		8	150	0,14	0,16	0,15	116,67			48,00		
		9	150	0,14	0,15	0,15	116,00			52,00		
42	06/06/17	A	200	0,14	0,15	0,14	34,50	36,00	2,60	17,00	17,00	2,50
		B	200	0,14	0,14	0,14	34,50			19,50		
		C	200	0,14	0,15	0,15	39,00			14,50		
49	13/06/17	1	200	0,12	0,13	0,13	32,50	30,67	5,97	12,50	15,33	4,48
		5	200	0,12	0,12	0,12	24,00			13,00		
		6	200	0,12	0,13	0,12	35,50			20,50		
56	20/06/17	1	200	0,14	0,15	0,15	45,00	46,33	1,89	13,00	9,50	3,77
		2	200	0,14	0,15	0,15	48,50			10,00		
		3	200	0,14	0,14	0,14	45,50			5,50		
63	27/06/17	1	150	0,13	0,15	0,15	142,67	184,44	78,80	37,33	44,89	13,09
		2	150	0,14	0,16	0,15	135,33			37,33		
		3	150	0,13	0,17	0,16	275,33			60,00		
70	4/07/2017	1	150	0,13	0,15	0,15	112,67	106,02	6,72	34,00	31,85	2,02
		2	130	0,14	0,15	0,15	99,23			30,00		
		3	130	0,14	0,15	0,15	106,15			31,54		
77	11/7/2017	A	150	0,12	0,14	0,14	137,33	125,33	15,87	29,33	28,89	0,38
		B	150	0,13	0,15	0,14	131,33			28,67		
		C	150	0,12	0,14	0,13	107,33			28,67		

Taula III. Valors Sòlids en Suspensió Totals i Volàtils de la Mostra 2

SST i SSV												
Dia	Data	MOSTRA 2 - FBR 1										
		Nº	V	P1	P2	P3	SST	SST m	Desv	SSV	SSV m	Desv
[-]	[-]	[-]	[mL]	[g]	[g]	[g]	[mg/L]	[mg/L]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[-]
1	26/04/17	1	200	0,11	0,11	0,11	16,00	12,83	5,06	10,50	9,67	1,89
		2	200	0,11	0,11	0,11	15,50			11,00		
		3	200	0,11	0,11	0,11	7,00			7,50		
8	3/05/17	9	200	0,12	0,12	0,12	36,00	25,33	10,07	31,00	22,50	8,26
		10	200	0,12	0,12	0,12	24,00			22,00		
		11	200	0,11	0,11	0,11	16,00			14,50		
14	9/05/17	4	200	0,14	0,14	0,14	10,00	7,17	2,75	8,50	7,50	1,32
		5	200	0,14	0,14	0,14	4,50			6,00		
		6	200	0,14	0,14	0,14	7,00			8,00		
21	16/05/17	1	200	0,14	0,14	0,14	10,50	9,83	0,58	10,00	8,17	2,36
		2	200	0,13	0,13	0,13	9,50			9,00		
		3	200	0,13	0,13	0,13	9,50			5,50		
28	23/5/17	4	200	0,16	0,16	0,16	20,50	17,67	2,47	17,00	14,33	2,31
		5	200	0,15	0,15	0,15	16,00			13,00		
		6	200	0,16	0,16	0,16	16,50			13,00		
35	30/05/17	10	70	0,13	0,14	0,13	68,57	78,19	8,85	65,71	75,24	10,20
		11	50	0,14	0,15	0,14	86,00			86,00		
		28	50	0,15	0,16	0,15	80,00			74,00		
42	06/06/17	D	50	0,14	0,15	0,14	188,00	213,78	34,78	182,00	184,00	31,71
		E	30	0,14	0,15	0,14	200,00			153,33		
		O	30	0,14	0,14	0,14	253,33			216,67		
49	13/06/17	4	30	0,12	0,13	0,12	426,67	423,89	3,47	346,67	380,56	36,98
		8	20	0,12	0,13	0,12	420,00			375,00		
		9	20	0,12	0,13	0,12	425,00			420,00		
56	20/06/17	4	30	0,14	0,14	0,14	46,67	56,89	9,08	26,67	46,22	17,97
		5	50	0,14	0,15	0,14	64,00			62,00		
		6	50	0,13	0,14	0,14	60,00			50,00		
63	27/06/17	4	30	0,14	0,14	0,14	230,00	220,00	8,82	190,00	178,89	11,71
		5	30	0,14	0,15	0,14	213,33			166,67		
		6	30	0,14	0,15	0,14	216,67			180,00		
70	4/07/17	4	30	0,14	0,15	0,14	260,00	259,44	4,19	236,67	209,44	23,59
		5	30	0,14	0,15	0,14	263,33			196,67		
		6	20	0,14	0,14	0,14	255,00			195,00		
77	11/7/17	D	30	0,13	0,14	0,13	296,67	315,56	34,17	173,33	216,11	40,97
		E	20	0,13	0,14	0,13	295,00			220,00		
		F	20	0,13	0,14	0,13	355,00			255,00		

Taula IV. Valors Sòlids en Suspensió Totals i Volàtils de la Mostra 3

SST i SSV												
Dia	Data	MOSTRA 3 - FBR 2										
		Nº	V	P1	P2	P3	SST	SST m	Desv	SSV	SSV m	Desv
[-]	[-]	[-]	[mL]	[g]	[g]	[g]	[mg/L]	[mg/L]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[-]
1	26/04/17	4	200	0,11	0,11	0,11	14,50	13,00	2,12	12,00	11,00	1,32
		5	200	0,11	0,11	0,11	-			11,50		
		6	200	0,11	0,11	0,11	11,50			9,50		
8	3/05/17	12	200	0,11	0,12	0,11	8,00	12,33	6,25	11,00	11,67	5,53
		13	200	0,12	0,12	0,12	19,50			17,50		
		14	200	0,11	0,12	0,11	9,50			6,50		
14	9/05/17	7	200	0,14	0,14	0,14	5,00	6,50	1,80	3,50	4,33	2,36
		8	200	0,14	0,14	0,14	6,00			7,00		
		9	200	0,14	0,14	0,14	8,50			2,50		
21	16/05/17	4	200	0,14	0,14	0,14	11,50	9,50	2,00	14,50	9,67	4,37
		5	200	0,14	0,14	0,14	9,50			8,50		
		6	200	0,13	0,13	0,13	7,50			6,00		
28	23/5/17	7	200	0,16	0,17	0,16	26,00	31,50	5,07	16,50	20,33	3,40
		8	200	0,15	0,16	0,16	36,00			23,00		
		9	200	0,15	0,16	0,15	32,50			21,50		
35	30/05/17	22	70	0,15	0,16	0,15	70,00	86,00	26,00	74,29	84,76	23,80
		23	50	0,15	0,15	0,15	72,00			68,00		
		24	50	0,15	0,16	0,15	116,00			112,00		
42	06/06/17	G	50	0,13	0,14	0,14	166,00	159,78	11,36	142,00	138,44	16,95
		H	30	0,14	0,14	0,14	166,67			153,33		
		I	30	0,14	0,14	0,14	146,67			120,00		
49	13/06/17	7	30	0,12	0,13	0,12	410,00	406,67	15,28	296,67	332,22	31,20
		2	20	0,12	0,13	0,12	420,00			345,00		
		3	20	0,12	0,13	0,12	390,00			355,00		
56	20/06/17	7	100	0,14	0,14	0,14	16,00	17,33	4,16	20,00	15,33	8,96
		8	100	0,14	0,14	0,14	22,00			21,00		
		9	100	0,14	0,14	0,14	14,00			5,00		
63	27/06/17	7	30	0,14	0,14	0,14	213,33	238,89	35,95	146,67	164,44	27,95
		8	30	0,13	0,14	0,13	280,00			196,67		
		9	30	0,13	0,14	0,13	223,33			150,00		
70	4/07/17	7	50	0,14	0,14	0,14	44,00	66,67	19,73	40,00	60,00	17,32
		8	50	0,14	0,15	0,14	76,00			70,00		
		9	50	0,14	0,14	0,14	80,00			70,00		
77	11/7/17	G	30	0,13	0,13	0,13	250,00	242,22	6,94	123,33	138,89	13,88
		H	30	0,13	0,14	0,13	236,67			150,00		
		I	30	0,13	0,14	0,13	240,00			143,33		

Taula V. Valors Sòlids en Suspensió Totals i Volàtils de la Mostra 4

SST i SSV												
Dia	Data	MOSTRA 4 - FBR 3										
		Nº	V	P1	P2	P3	SST	SST m	Desv	SSV	SSV m	Desv
[-]	[-]	[-]	[mL]	[g]	[g]	[g]	[mg/L]	[mg/L]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[-]
1	26/04/17	7	200	0,11	0,11	0,11	23,00	15,67	6,37	15,50	11,33	3,69
		8	200	0,11	0,12	0,11	11,50			8,50		
		9	200	0,11	0,11	0,11	12,50			10,00		
8	3/05/17	15	200	0,11	0,12	0,11	5,00	9,17	3,82	9,50	12,00	2,29
		16	200	0,11	0,11	0,11	10,00			12,50		
		17	200	0,12	0,12	0,12	12,50			14,00		
14	9/05/17	10	200	0,15	0,15	0,15	1,50	4,17	2,75	4,00	2,00	2,00
		11	200	0,14	0,14	0,14	4,00			2,00		
		12	200	0,14	0,14	0,14	7,00			0,00		
21	16/05/17	7	200	0,13	0,13	0,13	3,50	6,33	2,47	3,50	6,50	2,65
		8	200	0,14	0,14	0,14	7,50			8,50		
		9	200	0,14	0,14	0,14	8,00			7,50		
28	23/5/17	11	120	0,15	0,16	0,15	77,50	80,83	3,25	73,33	71,78	3,29
		12	100	0,16	0,16	0,16	84,00			74,00		
		14	100	0,15	0,16	0,15	81,00			68,00		
35	30/05/17	25	100	0,15	0,16	0,15	128,00	123,62	5,72	84,00	92,29	28,77
		26	70	0,15	0,16	0,15	125,71			124,29		
		27	70	0,14	0,15	0,14	117,14			68,57		
42	06/06/17	J	50	0,14	0,14	0,14	58,00	62,00	4,00	52,00	57,33	4,62
		K	50	0,14	0,14	0,14	66,00			60,00		
		L	50	0,14	0,14	0,14	62,00			60,00		
49	13/06/17	10	35	0,12	0,13	0,13	314,29	279,21	41,54	265,71	235,24	50,74
		11	30	0,13	0,13	0,13	233,33			176,67		
		12	30	0,12	0,13	0,12	290,00			263,33		
56	20/06/17	10	30	0,14	0,14	0,14	286,67	262,22	29,12	190,00	195,56	12,62
		11	30	0,14	0,14	0,14	270,00			210,00		
		12	30	0,14	0,14	0,14	230,00			186,67		
63	27/06/17	10	25	0,13	0,15	0,14	580,00	521,06	56,15	400,00	376,97	32,34
		11	20	0,13	0,14	0,14	515,00			340,00		
		12	22	0,14	0,15	0,14	468,18			390,91		
70	4/07/17	14	20	0,14	0,15	0,15	595,00	553,33	48,56	375,00	360,00	18,03
		15	20	0,13	0,14	0,14	565,00			340,00		
		16	20	0,14	0,15	0,14	500,00			365,00		
77	11/7/17	J	20	0,13	0,14	0,13	415,00	463,33	45,37	315,00	305,00	13,23
		K	20	0,13	0,14	0,14	505,00			310,00		
		L	20	0,13	0,14	0,13	470,00			290,00		

**Taula VI.** Valors de la Demanda Química d'Oxigen (DQO) de la Mostra 1, 2, 3 i 4

DQO													
Dia	Data	MOSTRA 1 - Tanc entrada			MOSTRA 2 - PBR1			MOSTRA 3 - PBR2			MOSTRA 4 - PBR3		
		DQOt	DQOt m	Desv	DQOt	DQOt m	Desv	DQOt	DQOt m	Desv	DQOt	DQOt m	Desv
[-]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[-]
8	03/05/17	67,3	62,1	6,2	25,5	24,4	1,3	36,8	40,2	11,4	40,4	35,5	10,3
		55,3			24,6			30,9			23,7		
		63,8			23,0			52,9			42,5		
14	09/05/17	188,0	154,0	43,5	213,0	142,3	73,7	252,0	300,2	236,4	119,0	100,8	21,9
		169,0			148,0			557,0			107,0		
		105,0			65,9			91,7			76,5		
21	16/05/17	-	-	-	47,4	71,2	20,7	72,1	64,8	14,9	83,3	119,4	36,9
		-			81,1			47,7			157,0		
		-			85,0			74,6			118,0		
28	23/05/17	75,4	110,5	36,9	148,0	178,7	52,3	89,4	103,1	12,3	140,0	131,0	10,1
		149,0			149,0			107,0			133,0		
		107,0			239,0			113,0			120,0		
35	30/05/17	126,0	157,7	48,1	140,0	142,7	2,5	178,0	150,7	26,1	230,0	178,7	45,4
		213,0			145,0			126,0			162,0		
		134,0			143,0			148,0			144,0		



42	06/06/17	113,0	98,4	13,3	192,0	163,3	29,0	189,0	163,0	23,9	158,0	161,0	3,0
		95,0			134,0			158,0			161,0		
		87,1			164,0			142,0			164,0		
49	13/06/17	175	139,3	35,0	243	252,0	13,1	280	258,3	19,3	269	271,7	7,4
		105			267			243			280		
		138			246			252			266		
56	20/06/17	43,3	58,5	16,5	193	181,7	12,7	113	119,0	12,2	134	126,7	7,0
		76,1			184			133			120		
		56,2			168			111			126		
63	27/06/17	190	159,3	34,5	101	118,0	16,5	105	123,0	24,6	85,4	81,2	4,2
		166			134			113			81,2		
		122			119			151			77,1		
70	04/07/17	133	144,0	9,5	106	117,0	10,5	147	152,0	12,3	88,3	99,8	9,9
		150			127			143			105		
		149			118			166			106		

**Taula VII.** Valors de l'Amoni (NH_4^+) de la Mostra 1, 2, 3 i 4

Amoni													
Dia	Data	MOSTRA 1 - Tanc entrada			MOSTRA 2 - FBR 1			MOSTRA 3 - FBR 2			MOSTRA 4 - FBR 3		
		abs	F. D.	Amoni	abs	F. D.	Amoni	abs	F. D.	Amoni	abs	F. D.	Amoni
[-]	[-]	[-]	[-]	[mg/L]	[-]	[-]	[mg/L]	[-]	[-]	[mg/L]	[-]	[-]	[mg/L]
1	26/04/17	-	-	-	1,65	1	1,97	1,55	1	1,84	1,18	1	1,40
8	3/05/17	0,66	10	7,81	0,01	10	0,06	0,03	10	0,22	0,01	10	0,00
14	9/05/17	0,40	10	4,74	0,01	10	0,00	0,01	10	0,00	0,01	10	0,04
21	16/05/17	0,06	10	0,59	0,03	1	0,03	0,03	1	0,03	0,01	1	0,01
28	23/05/17	0,84	10	9,98	0,02	1	0,02	0,62	1	0,74	0,02	1	0,02
35	30/05/17	0,09	10	1,03	0,06	1,67	0,10	0,08	1,67	0,14	0,02	1	0,01
42	06/06/17	0,31	1,67	0,61	0,03	1	0,03	0,03	1	0,03	0,02	1	0,01
49	13/06/17	0,42	10	4,90	0,07	1	0,07	0,22	1	0,25	0,42	1	0,49
56	20/06/17	0,52	10	6,13	0,44	1	0,52	0,44	1	0,51	0,44	1	0,52
63	27/08/17	0,17	10	1,89	0,23	1	0,26	0,99	1	1,17	0,17	1,67	0,33
70	04/07/17	0,02	10	0,11	0,05	1	0,05	0,03	2	0,04	0,04	1	0,03

**Taula VIII.** Valors dels Anions (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) de la Mostra 1 i 2

Anions													
Dia	Data	MOSTRA 1 - Tanc entrada						MOSTRA 2 - FBR 1					
		Nitrits $[\text{NO}_2^-]$	NO_2^- -N	Nitrats $[\text{NO}_3^-]$	NO_3^- -N	Ortofosfats $[\text{PO}_4^{3-}]$	PO_4^{3-} -P	Nitrits $[\text{NO}_2^-]$	NO_2^- -N	Nitrats $[\text{NO}_3^-]$	NO_3^- -N	Ortofosfats $[\text{PO}_4^{3-}]$	PO_4^{3-} -P
[-]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
1	26/04/17	-	-	-	-	-	-	2,637	0,803	16,471	3,719	0,000	0,000
8	03/05/17	5,964	1,815	51,600	11,652	4,182	1,364	0,000	0,000	3,758	0,849	0,000	0,000
14	09/05/17	6,958	2,118	31,657	7,148	0,000	0,000	0,000	0,000	3,637	0,821	0,000	0,000
21	16/05/17	0,000	0,000	41,308	9,328	7,182	2,342	0,000	0,000	4,090	0,924	0,000	0,000
28	24/05/17	4,823	1,468	45,138	10,192	6,857	2,236	0,000	0,000	4,878	1,101	0,000	0,000
35	30/05/17	0,000	0,000	35,521	8,021	6,866	2,239	0,000	0,000	5,878	1,327	0,000	0,000
42	06/06/17	0,000	0,000	23,467	5,299	0,000	0,000	0,000	0,000	7,334	1,656	0,000	0,000
49	13/06/17	0,000	0,000	34,665	7,828	0,000	0,000	0,000	0,000	4,155	0,938	0,000	0,000
56	20/06/17	0,000	0,000	27,647	6,243	0,000	0,000	0,000	0,000	3,734	0,843	0,000	0,000
63	27/06/17	13,638	4,151	29,172	6,587	0,000	0,000	0,000	0,000	3,651	0,824	0,000	0,000
70	04/07/17	0,000	0,000	50,318	11,362	0,000	0,000	0,000	0,000	4,353	0,983	0,000	0,000

**Taula IX.** Valors dels Anions (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) de la Mostra 3 i 4

Anions													
Dia	Data	MOSTRA 3 - FBR 2						MOSTRA 4 - FBR 3					
		Nitrits [NO_2^-]	NO_2^- -N	Nitrats [NO_3^-]	NO_3^- -N	Ortofosfats [PO_4^{3-}]	PO_4^{3-} -P	Nitrits [NO_2^-]	NO_2^- -N	Nitrats [NO_3^-]	NO_3^- -N	Ortofosfats [PO_4^{3-}]	PO_4^{3-} -P
[-]	[-]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
1	26/04/17	4,133	1,258	15,843	4,822	0,000	0,000	4,465	1,359	16,921	5,150	0,000	0,000
8	03/05/17	26,973	8,209	42,317	12,879	0,000	0,000	5,625	1,712	5,748	1,749	0,000	0,000
14	09/05/17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21	16/05/17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
28	24/05/17	5,081	1,546	11,785	3,587	0,000	0,000	0,000	0,000	3,100	0,943	0,000	0,000
35	30/05/17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
42	06/06/17	0,000	0,000	4,422	1,346	0,000	0,000	0,000	0,000	7,220	2,197	0,000	0,000
49	13/06/17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
56	20/06/17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
63	27/06/17	11,588	3,527	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
70	04/07/17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Taula X. Valors la clorofil·la a de la Mostra 2

Clorofil·la a												
Dia	Data	MOSTRA 2 - FBR 1										
		1 750	1 664	1 647	1 630	A664	A647	A630	Va	Vm	Ca	Ca m
[-]	[-]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[mL]	[mL]	[mg/L]	[mg/L]
49	13/06/17	0,090	0,162	0,121	0,102	0,072	0,031	0,060	5	7	0,5719	0,3106
		0,060	0,068	0,078	0,081	0,008	0,018	-0,013	5	6,9	0,0494	
56	20/06/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
63	27/06/17	0,486	0,501	0,496	0,499	0,015	0,01	0,002	5	7,2	0,1126	0,1069
		0,484	0,497	0,492	0,496	0,013	0,008	0,001	5	7	0,1012	
70	4/07/017	0,01	0,027	0,016	0,019	0,017	0,006	0,008	5	7,3	0,1312	0,1393
		0,001	0,02	0,009	0,012	0,019	0,008	0,008	5	7,2	0,1474	

Taula XI. Valors la clorofil·la a de la Mostra 3

Clorofil·la a												
Dia	Data	MOSTRA 3 - FBR 2										
		1 750	1 664	1 647	1 630	A664	A647	A630	Va	Vm	Ca	Ca m
[-]	[-]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[mL]	[mL]	[mg/L]	[mg/L]
49	13/06/17	0,066	0,122	0,086	0,079	0,056	0,02	0,043	5	6,9	0,4561	0,4246
		0,076	0,126	0,102	0,101	0,05	0,026	0,025	5	7	0,3932	
56	20/06/17	0,012	0,013	0,013	0,012	0,001	0,001	0,001	5	7,2	0,0071	0,0390
		0,011	0,02	0,013	0,02	0,009	0,002	0	5	7,3	0,0709	
63	27/06/17	0,49	0,506	0,499	0,503	0,016	0,009	0,003	5	7,1	0,1236	0,3801
		0,602	0,677	0,639	0,625	0,075	0,037	0,052	5	6,5	0,6366	
70	4/07/17	0,532	0,55	0,536	0,525	0,018	0,004	0,025	5	6,3	0,1628	0,1536
		0,483	0,502	0,499	0,487	0,019	0,016	0,015	5	6,9	0,1444	

Taula XII. Valors la clorofil·la a de la Mostra 4

Clorofil·la a												
Dia	Data	MOSTRA 4 - FBR 3										
		1 750	1 664	1 647	1 630	A664	A647	A630	Va	Vm	Ca	Ca m
[-]	[-]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[mL]	[mL]	[mg/L]	[mg/L]
49	13/06/17	0,169	0,17	0,13	0,12	0,001	-0,039	0,05	5	6,5	0,0522	0,2813
		0,063	0,112	0,015	0,095	0,049	-0,048	0,017	5	6,4	0,5103	
56	20/06/17	0,042	0,07	0,047	0,052	0,028	0,005	0,018	5	7	0,2305	0,2536
		0,016	0,052	0,037	0,035	0,036	0,021	0,017	5	7,1	0,2767	
63	27/06/17	0,5	0,599	0,545	0,535	0,099	0,045	0,064	5	6,8	0,8079	0,6781
		0,496	0,569	0,572	0,54	0,073	0,076	0,029	5	6,8	0,5483	
70	4/07/17	0,017	0,093	0,03	0,027	0,076	0,013	0,066	5	6,9	0,6343	0,6013
		0,001	0,07	0,02	0,02	0,069	0,019	0,05	5	6,9	0,5684	

Taula XIII. Valors de la Producció de Biomassa de la Mostra 1, 2 i 3

Producció de Biomassa						
Dia	FBR 1		FBR 2		FBR 3	
	SSV	P Biomass	SSV	P Biomass	SSV	P Biomass
	[mg/L]	[mg/Ld]	[mg/L]	[mg/Ld]	[mg/L]	[mg/Ld]
1	9,67	0,97	11,00	1,10	11,33	1,13
8	22,50	2,25	11,67	1,17	12,00	1,20
14	7,50	0,75	4,33	0,43	2,00	0,20
21	8,17	0,82	9,67	0,97	6,50	0,65
28	14,33	1,43	20,33	2,03	71,78	7,18
35	75,24	7,52	84,76	8,48	92,29	9,23
42	184,00	18,40	138,44	13,84	57,33	5,73
49	380,56	38,06	332,22	33,22	235,24	23,52
56	46,22	4,62	15,33	1,53	195,56	19,56
63	178,89	17,89	164,44	16,44	376,97	37,70
70	209,44	20,94	60,00	6,00	360,00	36,00
77	216,11	21,61	138,89	13,89	305,00	30,50